



TUGAS AKHIR - TF 141581

**DESAIN DAN ANALISIS SISTEM
PENGKONDISIAN UDARA BERBASIS
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)
PADA KERETA UKUR SULAWESI
DI PT. INKA (PERSERO)**

**SHINTA APRILIA SAFITRI
NRP. 2413 100 005**

**Dosen Pembimbing :
Ir. Sarwono, M.M.
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - TF 141581

**DESIGN AND ANALYSIS OF AIR
CONDITIONING SYSTEM BASED ON
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)
FOR SULAWESI MEASUREMENT TRAIN
AT PT. INKA (PERSERO)**

**SHINTA APRILIA SAFITRI
NRP. 2413 100 005**

**Supervisors :
Ir. Sarwono, M.M.
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME


Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Shinta Aprilia Safitri
NRP : 2413100005
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Desain dan Analisis Sistem Pengkondisian Udara Berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada Kereta Ukur Sulawesi di PT. INKA (Persero)**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 6 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,



Shinta Aprilia Safitri
NRP. 2413100005

“Halaman ini memang dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**DESAIN DAN ANALISIS SISTEM PENGKONDISIAN
UDARA BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS* (CFD) PADA KERETA UKUR
SULAWESI DI PT. INKA (PERSERO)**

Oleh:

Shinta Aprilia Safitri
NRP. 2413 100 005

Surabaya, 6 Juli 2017

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing I**



Ir. Sarwono, MM.
NIPN. 195805301983031002

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing II**



Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
NIPN. 197612232005011001

**Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 193809022003121002

“Halaman ini memang dikosongkan”

**DESAIN DAN ANALISIS SISTEM PENGKONDISIAN
UDARA BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS* (CFD) PADA KERETA UKUR
SULAWESI DI PT. INKA (PERSERO)**



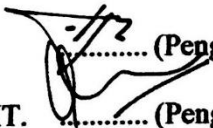
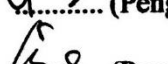

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SHINTA APRILIA SAFITRI
NRP. 2413 100 005

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|----------------------------------|---|-----------------|
| 1. Ir. Sarwono, MM. |  | (Pembimbing I) |
| 2. Dr. Ridho Hantoro, ST., MT. |  | (Pembimbing II) |
| 3. Ir. Roekmono, MT. |  | (Penguji I) |
| 4. Dr. Gunawan Nugroho, ST., MT. |  | (Penguji II) |
| 5. Lizda Johar Mawarni, ST., MT. |  | (Penguji III) |

SURABAYA
JULI, 2017

“Halaman ini memang dikosongkan”

**DESAIN DAN ANALISIS SISTEM PENGKONDISIAN
UDARA BERBASIS *COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS* (CFD) PADA KERETA UKUR
SULAWESI DI PT. INKA (PERSERO)**

Nama : Shinta Aprilia Safitri
NRP : 2413 100 005
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Sarwono, MM.
2. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

Abstrak

Sistem pengkondisian udara memegang peranan penting dalam menunjang tercapainya tingkat kenyamanan termal. Kenyamanan termal dalam kereta dapat tercapai apabila penumpang mendapatkan *supply* temperatur, tingkat kelembaban, maupun pergerakan udara yang ideal dari lingkungannya. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, Kereta Ukur Sulawesi membutuhkan kapasitas pendinginan minimum sebesar 106.116,13 Btu/hr atau setara dengan 31,1 kW. Beban tersebut dapat ditangani dengan memasang 2 unit AC dengan kapasitas masing-masing sebesar 17,5 kW. Udara dari AC menuju ke dalam kereta Ukur Sulawesi akan disalurkan lewat saluran udara yang dirancang dengan 2 bentuk, yaitu lurus dan bercabang yang masing-masing memiliki variasi sudut pengarah pada lubang keluaran udara. Analisis desain saluran udara dilakukan dengan menggunakan software berbasis CFD. Variasi sudut pengarah menyebabkan terjadinya perubahan temperatur rata-rata dalam kereta. Pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa desain saluran udara yang paling baik untuk diterapkan pada Kereta Ukur Sulawesi adalah saluran udara bercabang dengan variasi sudut pengarah 75 derajat. Variasi tersebut menghasilkan temperatur rata-rata 7,513°F dengan kelembaban relatif 78,3%.

Kata Kunci: Beban Pendinginan, CFD, Kereta Ukur Sulawesi, Sistem Pengkondisian Udara

“Halaman ini memang dikosongkan”

**DESIGN AND ANALYSIS OF AIR CONDITIONING
SYSTEM BASED ON COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS (CFD) FOR SULAWESI MEASUREMENT
TRAIN AT PT. INKA (PERSERO)**

Name : Shinta Aprilia Safitri
NRP : 2413 100 005
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : 1. Ir. Sarwono, MM.
2. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

Abstract

Air Conditioning system plays an important role in thermal comfort. Thermal comfort in the train can be achieved if the passengers get ideal supply of temperature, relative humidity, and air movement from its environment. Based on the calculations, the Sulawesi Measurement Train requires 106.116,13 Btu/hr or equivalent to 31,1 kW of minimum cooling capacity. This load can be handled by installing 2 Air Conditioner units which has 17,5 kW cooling capacity/unit. Air from AC will be distributed to the body of the train by using air ducts which is designed with two forms, single duct and branch duct. Each of the design has some variations of angle direction at the air outlet. The ducts design will be analyzed by using CFD software. The variations of angle causes the average temperature in the train changed. In this research, it's found that the best duct design to be applied to Sulawesi Measurement Train is a duct with 75 degree of angle variation which has 77,513 Tdb and 78,3% RH.

Keywords : Cooling Load, CFD, Sulawesi Measuremet Train, Air Conditioning System

“Halaman ini memang dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **Desain dan Analisis Sistem Pengkondisian Udara Berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada Kereta Ukur Sulawesi di PT. INKA (Persero).**

Selama penyusunan tugas akhir ini, penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika.
2. Bapak Ir. Sarwono, MM. dan Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan motivasi, ilmu, dan kesabaran selama membimbing penyelesaian tugas akhir.
3. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan.
4. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama menuntut ilmu di Departemen Teknik Fisika ITS.
5. Ayah Edhi Siswanto dan Ibu Endang Sri Purwanti selaku orang tua penulis. Terimakasih atas kepercayaan, motivasi, dan doa yang tidak henti-hentinya dipanjatkan untuk penulis. Semoga tugas akhir ini dapat menjadi hadiah ulang tahun yang berkesan.
6. Kakek Suradi Adi Sutrisno dan Nenek Ratemi atas kasih sayangnya selama 22 tahun ini. Semoga beliau senantiasa diberi kesehatan.
7. Saudara satu-satunya penulis, Adik Rahmanda Ilham Syah. Terima kasih karena telah menjadi alasan bagi

penulis untuk selalu berjuang memperbaiki diri dan menjadi kakak yang teladan.

8. Seluruh teman-teman TA-wan Lab. Energi, terima kasih untuk waktu, perhatian, dan kerja samanya.
9. Mbak Firdaus Retnaning Restu untuk bantuan yang telah diberikan selama ini.
10. Seluruh teman – teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2013, terima kasih telah menjadi keluarga kedua di tanah perantauan. Semoga kelak dipertemukan kembali dalam keadaan sukses dan berjaya.
11. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih banyak kekurangan, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 6 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
<i>Cover Page</i>	iii
Lembar Pengesahan I.....	vii
Lembar Pengesahan II.....	ix
Abstrak.....	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I <u>P</u> ENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	2
1. 3 Tujuan	2
1. 4 Batasan Masalah.....	2
BAB II <u>T</u> INJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Desain Mekanik Kereta Ukur Sulawesi	5
2.2 Kenyamanan Termal	7
2.3 Sistem Pengkondisian Udara pada Kereta Ukur Sulawesi	9
2.4 Beban Pendinginan.....	11
2.5 Perancangan Saluran Udara	15
2.6 Computational Fluid Dynamics (CFD)	16
BAB III <u>M</u> ETODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Studi Literatur	21
3.2 Data Perancangan.....	21
3.3 Diagram Alir Perhitungan Beban Pendinginan	24
3.3 Perhitungan Ukuran Saluran Udara.....	25
3.4 Simulasi CFD	26
BAB IV <u>A</u> NALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Perhitungan Beban Pendinginan	33

4.2	Perhitungan Udara Suplai	37
4.3	Pemilihan AC	40
4.4	Perhitungan Ukuran Saluran Udara	42
4.5	Hasil Simulasi.....	45
4.6	Hasil Analisa Psikrometrik	64
4.7	Pembahasan	65
BAB V		69
PENUTUP		69
5.1	Kesimpulan.....	69
5.2	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA.....		71
LAMPIRAN		73
BIODATA PENULIS.....		85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Desain mekanik kereta ukur sulawesi	6
Gambar 2.2	Rencana rute kereta ukur sulawesi	7
Gambar 2.3	Skema refrigerasi kompresi uap	10
Gambar 3.1	Diagram alir pengerjaan tugas akhir	20
Gambar 3.2	Diagram alir perhitungan cooling load.....	24
Gambar 3.3	Diagram alir perhitungan saluran udara	25
Gambar 3.4	Geometri kereta ukur.....	26
Gambar 3.5	Interior kereta ukur.....	26
Gambar 3.6	Geometri saluran udara	27
Gambar 3.7	Meshing pada badan kereta	28
Gambar 3.8	Streamline distribusi aliran udara	31
Gambar 3.9	Streamline distribusi aliran udara pada	31
Gambar 3.10	Kontur temperatur pada kereta ukur	32
Gambar 3.11	Kontur kecepatan udara di sekitar kepala	32
Gambar 4.1	Skema mixture air	39
Gambar 4.2	Desain saluran udara	43
Gambar 4.3	Bentuk lubang udara	44
Gambar 4.4	Bentuk pengarah pada lubang udara	44
Gambar 4.5	Streamline pada saluran udara lurus.....	45
Gambar 4.6	Streamline pada saluran bercabang	45
Gambar 4.7	Kontur distribusi temperatur pada saluran udara lurus 45 derajat	47
Gambar 4.8	Distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 45 derajat.....	48
Gambar 4.9	Kontur distribusi temperatur pada saluran udara lurus 60 derajat.....	49
Gambar 4.10	Distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 60 derajat.....	50

Gambar 4.11	Kontur distribusi temperatur pada saluran udara lurus 75 derajat	51
Gambar 4.12	Distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 75 derajat	52
Gambar 4.13	Kontur temperatur pada saluran udara lurus 90 derajat	53
Gambar 4.14	Grafik temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 90 derajat	54
Gambar 4.15	Kontur temperatur pada saluran udara bercabang 45 derajat	55
Gambar 4.16	Grafik temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 45 derajat	56
Gambar 4.17	Kontur temperatur pada saluran udara bercabang 60 derajat	57
Gambar 4.18	Grafik temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 60 derajat	58
Gambar 4.19	Kontur temperatur pada saluran udara bercabang 75 derajat	59
Gambar 4.20	Grafik temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 75 derajat	60
Gambar 4.21	Kontur distribusi temperatur pada saluran udara bercabang 90 derajat	61
Gambar 4.22	Grafik temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 90 derajat	62
Gambar 4.23	Comfort zone pada diagram psikrometrik	68

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Spesifikasi Teknis Kereta Ukur	22
Tabel 3. 2	Parameter Set-up.....	29
Tabel 3. 3	Input Boundary Conditions.....	29
Tabel 4. 1	Beban Akibat Konduksi pada Dinding.....	35
Tabel 4. 2	Beban Konduksi pada Lantai.....	35
Tabel 4. 3	Beban Konduksi pada Kaca Jendela.....	36
Tabel 4. 4	Beban Radiasi pada Kaca Jendela	36
Tabel 4. 5	Beban Peralatan	37
Tabel 4. 6	Beban Ventilasi.....	37
Tabel 4. 7	Beban-beban pada Kereta Ukur Sulawesi	38
Tabel 4. 8	Beban pada 1 AC.....	38
Tabel 4. 9	Spesifikasi AC	41
Tabel 4. 10	Ukuran Saluran Udara Lurus.....	42
Tabel 4. 11	Ukuran Saluran Udara Bercabang	42
Tabel 4. 12	Kecepatan Udara pada Saluran Udara Lurus.....	63
Tabel 4. 13	Kecepatan Udara Saluran Udara Bercabang	64
Tabel 4. 14	Tingkat Kenyamanan Termal pada Kereta Ukur Sulawesi.....	65

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan SNI 03-6390-2000, pengkondisian udara diperlukan untuk mengendalikan temperatur ruangan, kelembaban relatif, kualitas serta persebaran udara. (Badan Standardisasi Nasional, 2000) Kenyamanan termal dalam kereta dapat tercapai ketika penumpang mendapatkan *supply* temperatur udara, tingkat kelembaban, maupun panas yang ideal dari lingkungan sekitarnya. (Haller, 2006) Oleh sebab itu, perlu dipasang suatu sistem pengkondisian udara (*Air Conditioning System*) pada Kereta Ukur Sulawesi untuk menunjang tercapainya tingkat kenyamanan termal yang dibutuhkan oleh penumpang.

Sesuai dengan spesifikasi teknis kereta ukur yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Perkeretaapian Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, pada Kereta Ukur Sulawesi akan dilengkapi dengan dua buah AC sentral. (Direktorat Jenderal Perkeretaapian Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2015) Namun, penggunaan AC sentral seringkali mengakibatkan timbulnya beberapa masalah dari segi energi maupun segi ekonomi. (Nasution dkk, 2015) Ditinjau dari sisi energi, sebanyak 70% dari total penggunaan energi dalam kereta api terpakai untuk memenuhi kebutuhan sistem pengkondisian udara. (Liu dkk, 2010) Sedangkan dari sisi ekonomi, penggunaan AC sentral menyebabkan peningkatan *initial cost* untuk biaya instalasi saluran udara maupun isolasi termal. (Bhatia, 2012)

Sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka perlu dilakukan optimasi desain pada sistem pengkondisian udara. (Gonzalez-Gil dkk, 2014) Perancangan desain sistem pengkondisian udara yang baik dan efektif akan menghasilkan *supply* udara yang lebih baik serta meminimalisir terjadinya kerugian pada saat proses pendistribusian udara.

(ISOVER, 2011) Sehingga, pada tugas akhir ini akan dilakukan desain dan analisis sistem pengkondisian udara dengan menggunakan *software* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk diterapkan pada Kereta Ukur Sulawesi di PT. INKA (Persero).

1. 2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah dari penulisan tugas akhir ini adalah:

- a. Bagaimana perhitungan beban pendinginan pada Kereta Ukur Sulawesi?
- b. Bagaimana desain saluran udara pada sistem pengkondisian udara Kereta Ukur Sulawesi?

1. 3 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan permasalahan maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Melakukan perhitungan beban pendinginan pada Kereta Ukur Sulawesi.
- b. Merancang saluran udara pada sistem pengkondisian udara Kereta Ukur Sulawesi.

1. 4 Batasan Masalah

Bedasarkan identifikasi masalah maka batasan masalah dari tugas akhir ini adalah:

- a. Perhitungan beban pendinginan menggunakan metode CLTD.
- b. Data temperatur dan RH untuk keperluan desain menggunakan data dari BMKG Makassar pada bulan Desember 2016.
- c. Sistem Pengkondisian udara yang digunakan berbentuk AC paket (*unitary air conditioning system*).
- d. Perhitungan saluran udara menggunakan metode *Equal Friction*.

- e. Pembuatan geometri dan pengujian desain saluran udara menggunakan *software* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Desain Mekanik Kereta Ukur Sulawesi

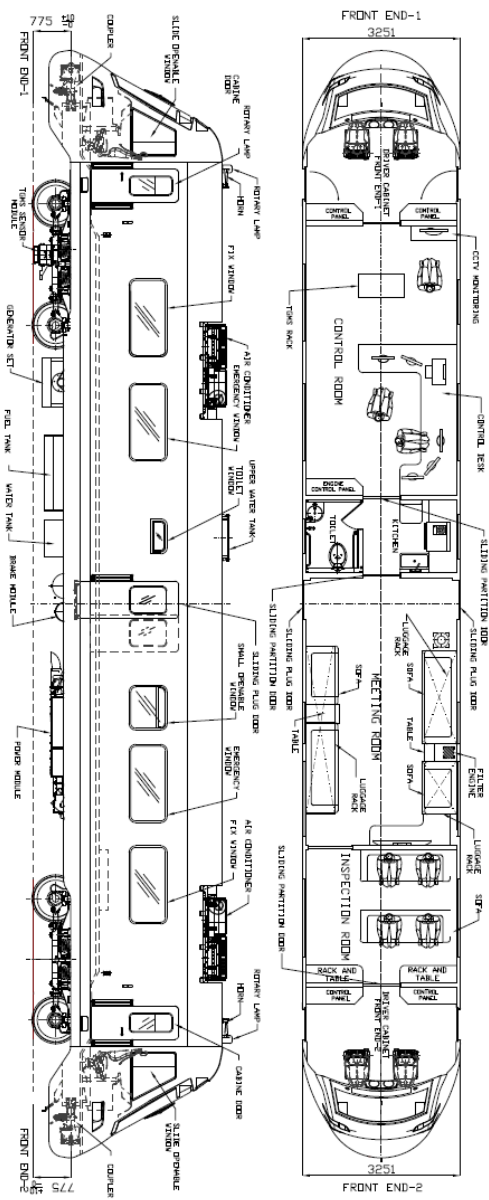
Dalam rangka meningkatkan pelayanan angkutan kereta api di Indonesia, diperlukan dukungan prasarana berupa lokomotif, kereta penumpang maupun gerbong yang handal. Untuk menjamin kualitas dan kehandalan dari prasarana tersebut, maka dibutuhkan suatu sarana pendukung berupa kereta ukur. Kereta ukur merupakan suatu kereta yang digunakan untuk keperluan pengukuran dan pengujian prasarana penunjang kereta api. Hal ini dimaksudkan untuk menjamin keselamatan perjalanan kereta api dan memastikan kenyamanan penumpang.

Menurut Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, sistem peralatan ukur pada kereta ukur digunakan untuk melakukan pengukuran yang meliputi:

- a. Pengujian posisi jalan rel
- b. Pengukuran geometri jalan rel
- c. Pengukuran profil rel
- d. Pengukuran geometri kawat *trolley* listrik aliran atas

Sehingga pada setiap peralatan kereta didesain tidak menimbulkan EMI (*Electro Magnetic Interference*) yang dapat mengganggu sistem persinyalan, perangkat proteksi pintu lintasan, dan sistem telekomunikasi. Badan kereta dan komponen dirancang untuk mengurangi pengaruh medan magnet terhadap penumpang.

Pemeriksaan rel dengan kereta ukur harus dilakukan secara berkala. Hal ini dilatarbelakangi oleh kondisi rel yang dapat berubah dari bentuk idealnya, atau mengalami cacat karena kerusakan material maupun faktor cuaca. Desain mekanik dari Kereta Ukur Sulawesi ditunjukkan pada gambar 2.1.



Kereta Ukur Sulawesi rencananya akan beroperasi di Sulawesi dengan rute Makassar-Manado sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Rencana rute kereta ukur sulawesi
(sumber: Detik.com)

2.2 Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal adalah suatu interaksi termal antara manusia dan persekitarannya yang memuaskan pikiran manusia. (Auliciems & Szokolay, 1977) Prinsip dari

kenyamanan termal yaitu terciptanya keseimbangan antara suhu tubuh manusia dengan suhu tubuh sekitarnya. Jika suhu tubuh manusia dengan lingkungannya memiliki perbedaan suhu yang signifikan, maka akan terjadi ketidaknyamanan yang diwujudkan melalui kepanasan atau kedinginan yang dialami oleh tubuh. Berdasarkan SNI 03-6572-2001, terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kenyamanan seseorang, diantaranya: (Badan Standarisasi Nasional, 2001)

a. Kelembaban Udara Relatif (RH)

Kelembapan udara relatif adalah kemampuan udara untuk menerima kandungan uap air atau perbandingan antara tekanan uap terhadap tekanan jenuh air. Besar kecilnya nilai RH mempengaruhi kemampuan udara untuk menyerap uap air. (Ulfa, 2012)

Besarnya nilai RH didapatkan dari diagram psikrometrik, yaitu pada perpotongan nilai entalpi dan temperatur bola kering. Adapun persamaan untuk mendapatkan nilai h yaitu: (Stoecker, 1994)

$$h = (1,006 \cdot T_{ab}) + [W \cdot (2501 + 1,805 \cdot T_{ab})] \quad (2.1)$$

dimana : h = entalpi $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$

T_{ab} = temperatur bola kering ($^{\circ}C$)

W = kelembapan mutlak $\left(\frac{kg_{uap\ air}}{kg_{udara\ kering}}\right)$

Nilai kelembapan udara relatif dikelompokkan menjadi beberapa kategori, diantaranya: (Satwiko, 2008)

- $RH \leq 40\%$: kurang nyaman, kulit merasa kering yang tidak wajar.
- $50\% \leq RH \leq 80\%$: nyaman, kulit kering wajar.
- $80\% < RH \leq 90\%$: hangat nyaman.
- $RH > 90\%$: tidak nyaman, udara pengap (terasa berat menekan).

b. Temperatur Udara Kering

Temperatur udara kering sangat besar pengaruhnya terhadap besar kecilnya kalor yang dilepas melalui

penguapan (evaporasi) dan melalui konveksi. Daerah kenyamanan termal untuk daerah tropis dapat dibagi menjadi:

- sejuk nyaman, antara temperatur efektif $20,5^{\circ}\text{C}$ - $22,8^{\circ}\text{C}$.
- nyaman optimal, antara temperatur efektif $22,8^{\circ}\text{C}$ - $25,8^{\circ}\text{C}$.
- hangat nyaman, antara temperatur efektif $25,8^{\circ}\text{C}$ - $27,1^{\circ}\text{C}$.

c. Pergerakan Udara (Kecepatan Udara)

Untuk mempertahankan kondisi nyaman, kecepatan udara yang jatuh diatas kepala tidak boleh lebih besar dari $0,5$ m/detik dan sebaiknya lebih besar dari $0,15$ m/detik.

d. Radiasi Permukaan yang Panas

Apabila di dalam suatu ruangan dinding - dinding sekitarnya panas, akan mempengaruhi kenyamanan seseorang di dalam ruangan tersebut, meskipun temperatur udara disekitarnya sesuai dengan tingkat kenyamanannya. Sedangkan ketika temperatur radiasi rata-rata lebih tinggi dari temperatur udara kering ruangan, maka temperatur udara ruangan rancangan dibuat lebih rendah dari temperatur rancangan biasanya.

e. Aktivitas Orang

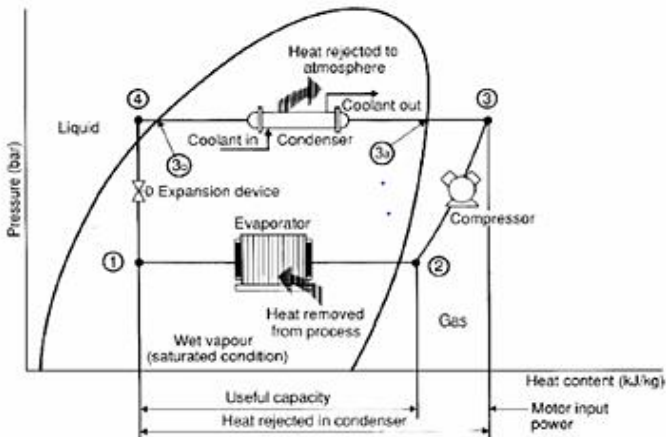
Tubuh manusia menghasilkan beban panas sebagai akibat dari proses metabolisme tubuh. Proses metabolisme tubuh sangat erat kaitannya dengan jenis aktivitas yang dilakukan manusia tersebut. Semakin berat jenis aktivitas yang dilakukan, maka akan semakin tinggi laju pertambahan kalor yang dihasilkan.

2.3 Sistem Pengkondisian Udara pada Kereta Ukur Sulawesi

Berdasarkan spesifikasi teknis yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Perkeretaapian Kementerian Perhubungan

Republik Indonesia, Kereta Ukur dilengkapi dengan dua buah AC berjenis paket (*unitary model*). AC jenis paket memiliki kompresor, kondensor, dan evaporator yang berada dalam satu unit dan dapat diletakkan di dalam atau di atap gerbong.

Proses pendinginan udara pada AC sentral dilakukan secara terpusat pada satu lokasi kemudian didistribusikan ke seluruh gerbong. Sistem refrigerasi yang digunakan pada AC sentral umumnya adalah sistem refrigerasi kompresi uap sederhana yang terdiri dari evaporator, kompresor, kondensor, dan katup ekspansi dengan dilengkapi *filter dryer* untuk menyaring kotoran dan uap air yang mungkin masih tersisa di dalam sistem refrigerasi.



Gambar 2.3 Skema refregerasi kompresi uap

Dalam melakukan perancangan maupun pemilihan mesin refrigerasi pada kereta, maka perlu diperhatikan hal-hal seperti sumber dan jenis daya yang digunakan, berat mesin, jenis kereta, kemudahan perawatan (*maintenance*), besar kapasitas pendinginan, serta jenis refrigeran yang digunakan. Jenis refrigeran yang sering digunakan adalah R-22, tetapi sejak dilarangnya penggunaan CFC pada sistem-sistem refrigerasi

dengan alasan merusak lingkungan, maka digunakan jenis refrigeran yang lebih ramah lingkungan seperti R-407C atau R-134a. (Ardiyanto, 2008)

2.4 Beban Pendinginan

Tujuan utama sistem pengkondisian udara adalah mempertahankan keadaan udara didalam ruangan dan meliputi pengaturan temperatur, kelembaban relatif, kecepatan sirkulasi udara maupun kualitas udara. Sistem pengkondisian udara yang dipasang harus mempunyai kapasitas pendinginan yang tepat dan dapat dikendalikan. Pada tahap perencanaan, perhitungan beban pendinginan yang tepat akan menjadi dasar untuk pemilihan jenis dan kapasitas peralatan pendinginan. Perhitungan beban pendinginan dilakukan dengan menggunakan metode *Cooling Load Temperature Difference* (CLTD). Metode ini seringkali digunakan untuk memperkirakan besarnya beban pendinginan yang dipengaruhi oleh tiga jenis beban panas (beban panas akibat konduksi, beban panas akibat radiasi, dan beban panas internal). (ASHRAE, 1997)

a. Beban Panas akibat konduksi

- Konduksi pada *Car Body* (Q_{cb})

Besarnya cooling load pada *Car Body* dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Q_{cb} = U_{cb} \times A_{cb} \times CLTD_c \quad (2.2)$$

dimana:

- $Q_{dinding}$ = beban kalor melalui dinding, Btu/hr
- U_D = koefisien perpindahan kalor menyeluruh dinding, Btu/hr. ft².°F
- A_D = luas permukaan perpindahan kalor dinding, ft²
- $CLTD_c$ = cooling load temperature difference correction, °F

Nilai $CLTD_c$ didapatkan dari persamaan berikut:

$$CLTD_C = (CLTD + LM) \times K + (78 - t_R) + (t_{0a} - 85) \quad (2.3)$$

dimana:

- t_{0a} = Temp. Desain - $(\frac{1}{2} \times \text{Daily Range})$
 - $CLTD$ = cooling load temperature difference, °F
 - LM = faktor koreksi untuk lintang dan bulan (1977 ASHRAE Fundamental chapter 25)
 - K = faktor koreksi untuk warna permukaan
= 1, untuk warna gelap atau daerah industri
= 0.65, untuk warna dinding terang
 - t_R = temperature ruangan, °F
 - t_{0a} = temperature rata-rata udara luar, °F
- Konduksi pada jendela
Beban konduksi pada jendela dinyatakan dalam persamaan 2.3.

$$Q_{Kaca} = U_{Kc} \times A_{Kc} \times CLTD_C \quad (2.4)$$

dimana:

- Q_{Kaca} = beban kalor melalui kaca, Btu/hr
- U_{Kc} = koefisien perpindahan kalor menyeluruh kaca, Btu/hr. ft².°F
- A_{Kc} = luas permukaan kaca, ft²

- Konduksi pada Lantai

$$Q_{Lantai} = U_{lt} \times A_{lt} \times TD \quad (2.5)$$

dimana:

- Q_{Lantai} = beban kalor melalui lantai, Btu/hr
- U_{lt} = koefisien perpindahan kalor menyeluruh lantai, Btu/hr. ft².°F
- A_{lt} = luas permukaan lantai, ft²
- TD = (temperature difference) beda temperature antara ruang yang dikondisikan dengan yang tidak dikondisikan, °F

- b. Beban Panas akibat radiasi

Beban panas akibat radiasi terjadi pada jendela kereta dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{KacaM} = A_{Kc} \times SC \times SHGF \times CLF_{Kc} \quad (2.6)$$

dimana:

- Q_{KacaM} = beban kalor karena radiasi matahari, Btu/hr
- SC = shading coefficient
- $SHGF$ = solar heat gain factor, Btu/hr.ft²
- CLF_{Kc} = cooling load factor untuk kaca

- c. Beban Infiltrasi dan Ventilasi

Udara luar akan didinginkan oleh sistem pengkondisian udara sebelum dialirkan ke dalam kereta. Beban pendinginan total (sensible dan laten) yang dihasilkan oleh ventilasi dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.6 dan 2.7.

$$Q_S = 1.1 \times CFM \times TD \quad (2.7)$$

$$Q_L = 0.68 \times CFM \times (W'_{oA} - W'_i) \quad (2.8)$$

dimana:

- Q_{VentS} = kalor sensible dari infiltrasi dan ventilasi, Btu/hr
- Q_{VentL} = kalor laten dari infiltrasi dan ventilasi, Btu/hr
- CFM = laju volume (debit) udara infiltrasi atau ventilasi, ft³/min (1977 ASHRAE Fundamental chapter 21 table 6)
- TD = beda temperature udara dalam dan luar ($t_o - t_R$), °F
- W'_i = rasio kelembaban dalam ruang (dalam gr water/lb dry air)
- W'_o = rasio kelembaban luar (dalam gr water/lb dry air)

d. Penumpang

Beban pendinginan oleh penumpang merupakan jenis beban panas sensible dan panas laten yang dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.9 dan 2.10.

$$Q_{OrangS} = q_s \times n \times CLF_p \quad (2.9)$$

$$Q_{OrangL} = q_L \times n \quad (2.10)$$

dimana:

- Q_{OrangS} = beban kalor sensible penghuni, Btu/hr
- Q_{OrangL} = beban kalorkalen penghuni, Btu/hr
- q_s, q_L = kalor sensible dan laten per orang, Btu/hr
- n = jumlah orang
- CLF_p = *cooling load factor for people*

e. Peralatan

Beban panas yang diakibatkan oleh peralatan dalam kereta dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.11.

$$Q_{Equipment} = (q_{EqS} \times CLF_{Eq}) + q_{EqL} \quad (2.11)$$

dimana:

- $Q_{Equipment}$ = beban kalor dari peralatan, Btu/hr
- $q_{EquipmentS}$ = kalor sensible peralatan penghuni, Btu/hr
- $q_{EquipmentL}$ = kalor laten yang dihasilkan suatu peralatan akibat pembakaran atau proses yang menghasilkan uap air, seperti memasak, Btu/hr
- CLF_{Eq} = *cooling load factor for Equipment*

2.5 Perancangan Saluran Udara

Saluran udara dirancang agar mampu menyalurkan udara yang telah dikondisikan secara optimal, sehingga ruangan dapat terkondisikan sesuai dengan keinginan. Maka dari itu, perlu dirancang suatu sistem saluran udara yang mampu menyuplai udara terkondisi ke setiap sudut ruangan. Dalam hal ini terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk merancang sistem saluran udara, diantaranya *velocity method*, *static regain method*, dan *equal friction method*.

Velocity method (metode kecepatan) merupakan suatu metode perhitungan ukuran saluran udara yang dilakukan dengan cara menentukan kecepatan di dalam saluran utama dan cabang-cabang. Lalu dihitung penurunan tekanan pada semua aliran. Pada metode ini *fan* (kipas) dipilih sedemikian rupa sehingga dapat membangkitkan tekanan yang mampu mencukupi kebutuhan pada saluran yang penurunan tekanannya terbesar.

Static regain method (metode tekanan total) adalah suatu metode yang dilakukan dengan cara menaikkan tekanan statik pada saluran udara ketika kecepatannya menurun. Metode ini berdasarkan persamaan Bernoulli, yang menyatakan bahwa ketika terjadi penurunan kecepatan, maka akan terjadi perubahan dari tekanan dinamik menjadi tekanan statik. Pada metode ini, untuk mengurangi kecepatan pada setiap cabang, maka tekanan statiknya dinaikkan sehingga cukup untuk menjaga kehilangan tekanan (*frictional losses*) sampai cabang berikutnya.

Sedangkan *equal friction method* (metode gesekan sama) adalah suatu metode perhitungan ukuran saluran udara dengan cara menentukan laju gesekan (*friction rate*) per panjangnya saluran udara. Laju gesekan tersebut dijaga agar tetap konstan untuk setiap sistem saluran udara. Nilai laju gesekan ditentukan berdasarkan kecepatan maksimum yang diijinkan pada saluran udara utama. (Ardiyanto, 2008) Metode ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode lain, diantaranya:

- Metode ini mudah digunakan dan mampu memberikan nilai penurunan kecepatan udara dalam saluran secara otomatis. Penurunan kecepatan tersebut juga berpengaruh pada pembatasan noise, sehingga lebih nyaman untuk diterapkan pada lingkungan.
- Metode ini juga sangat simpel dalam hal perhitungannya, karena dapat dilakukan dengan menggunakan tabel sederhana.
- Aliran udara pada saluran udara tiap 100 ft memiliki nilai *total pressure drop* yang sama sehingga cocok digunakan untuk desain yang simetris.
- Metode ini sangat cocok untuk diterapkan pada sistem CAV (*constant air volume*).

2.6 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Komputasi fluida dinamik atau CFD adalah penyelesaian aliran dinamika fluida secara numerik yang dilakukan oleh

komputer. (Prianto, 2015) CFD pada umumnya digunakan untuk memprediksi perpindahan panas, aliran fluida, gerakan mekanis, dan lain sebagainya. Penggunaan *software* berbasis CFD dipilih karena mampu memberikan gambaran 3D dari obyek yang diteliti. Selain itu, simulasi dengan *software* CFD memiliki beberapa kelebihan, diantaranya: (Didwania, Singh, Malik, & Sisodiya, 2014)

- 1) Lebih efektif dan efisien jika dibandingkan dengan metode EFD (*Experimental Fluid Dynamics*)
- 2) CFD menyediakan database yang cukup valid untuk mengamati bidang aliran
- 3) Simulasi CFD untuk mengamati fenomena fisik dari fluida lebih mudah dilakukan dari pada secara eksperimen.
- 4) *Full scale simulation* (kapal, kereta, pesawat, dll)

Dalam melakukan simulasi fluida pada CFD, ada tiga garis besar tahapan yang harus dilakukan, yaitu: (Ulfa, 2012)

a. *Pre-processing*

Pada tahap ini dimasukkan data berupa pendefinisian domain dan penentuan kondisi batas (*boundary condition*). Selain itu juga dilakukan pembagian *grid* ruangan atau biasa disebut *meshing*.

b. *Solver (processor)*

Proses pengaturan model numerik, penghitungan iterasi dan pengamatan solusi numerik dilakukan pada tahap ini. Penghitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap *control volume* dengan proses integrase persamaan diskrit hingga hasilnya mencapai nilai yang konvergen.

c. *Post-processing*

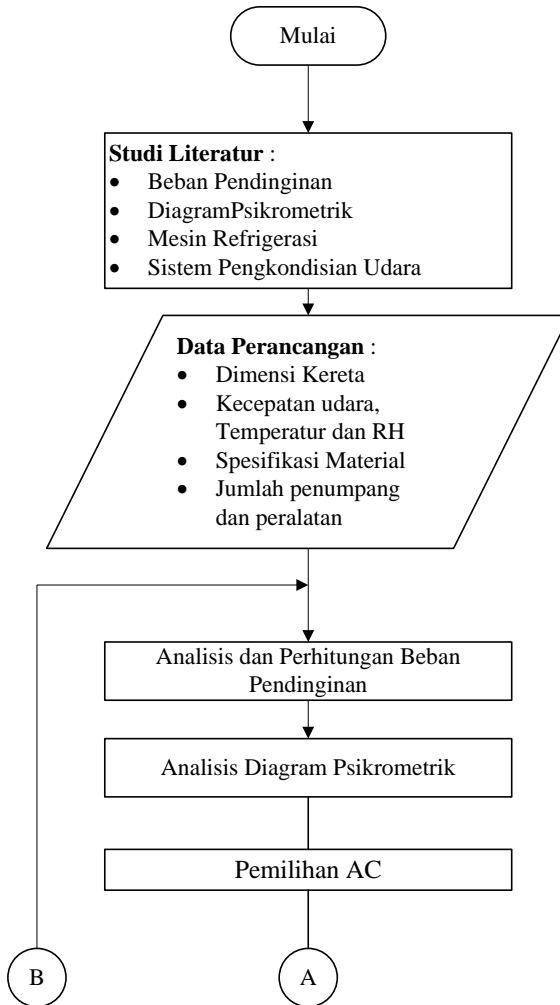
Pada tahapan akhir hasil perhitungan akan diinterpretasikan ke dalam bentuk gambar, grafik, maupun animasi dengan pola warna tertentu.

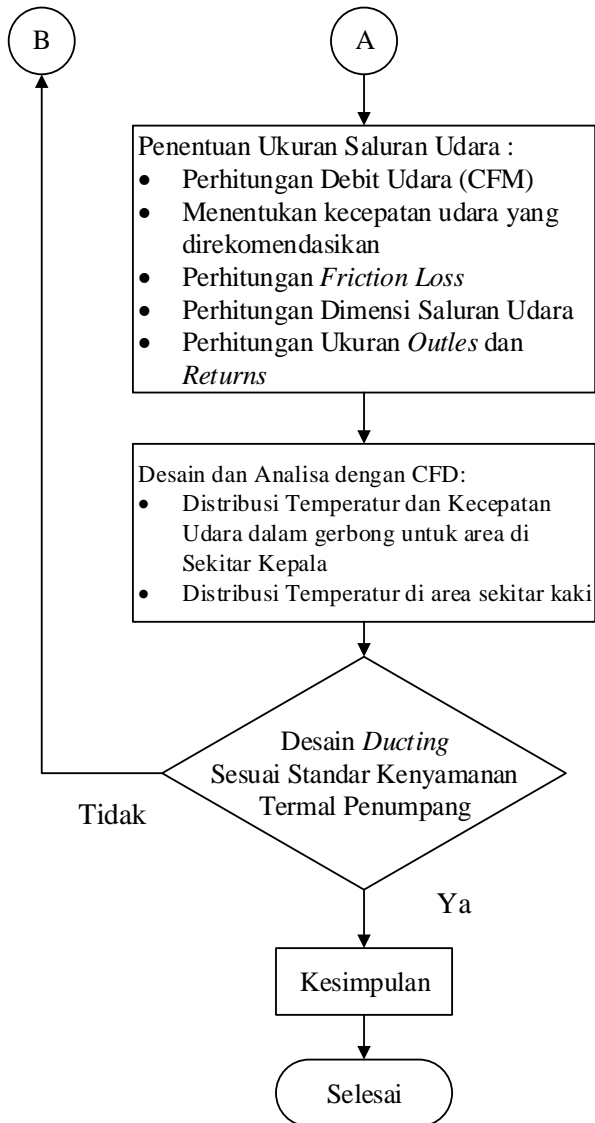
“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah dalam pengerjaan tugas akhir ditunjukkan pada diagram alir dibawah ini.





Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir

3.1 Studi Literatur

Dalam melakukan penyusunan laporan tugas akhir ini diperlukan konsep dan ide awal untuk pelaksanaannya. Studi literatur dimaksudkan untuk membangun pemahaman mengenai topik tugas akhir. Oleh karena itu, diperlukan studi literatur yang berhubungan erat dengan sistem pengkondisian udara khususnya pada kereta dan beberapa referensi dari penelitian sebelumnya. Pendalaman materi juga dilakukan terhadap perhitungan beban pendinginan, diagram psikrometrik, mesin refrigerasi, serta metode perhitungan ukuran saluran udara. Teori yang berdasarkan jurnal - jurnal penelitian dan tugas akhir yang sudah pernah dilakukan dan juga studi teoritis dari *handbook* dengan tema *Air Conditioning*. Tugas Akhir ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan *software* berbasis CFD maka juga diperlukan studi pembelajaran tentang tahapan pada *software* yang akan dijalankan.

3.2 Data Perancangan

Data perancangan mencakup data primer dan data sekunder. Data primer meliputi data ukuran kereta, konstruksi, jenis peralatan, dan jumlah penumpang. Sedangkan data sekunder adalah data kondisi perancangan.

3.2.1 Data Primer

Berikut ini merupakan data spesifikasi Kereta Ukur Sulawesi:

- Panjang kereta : 72,18 ft (22000 mm)
- Lebar kereta : 10,67 ft (3251 mm)
- Tinggi lantai ke atap : 10,25 ft (3125 mm)
- Kecepatan maks kereta : 328084 ft/hr (100 km/hr)
- Temperatur lingkungan : 75,2°F - 92,12°F (24-33,4°C)
- Wilayah operasi : Sulawesi

Tabel 3. 1 Spesifikasi Teknis Kereta Ukur

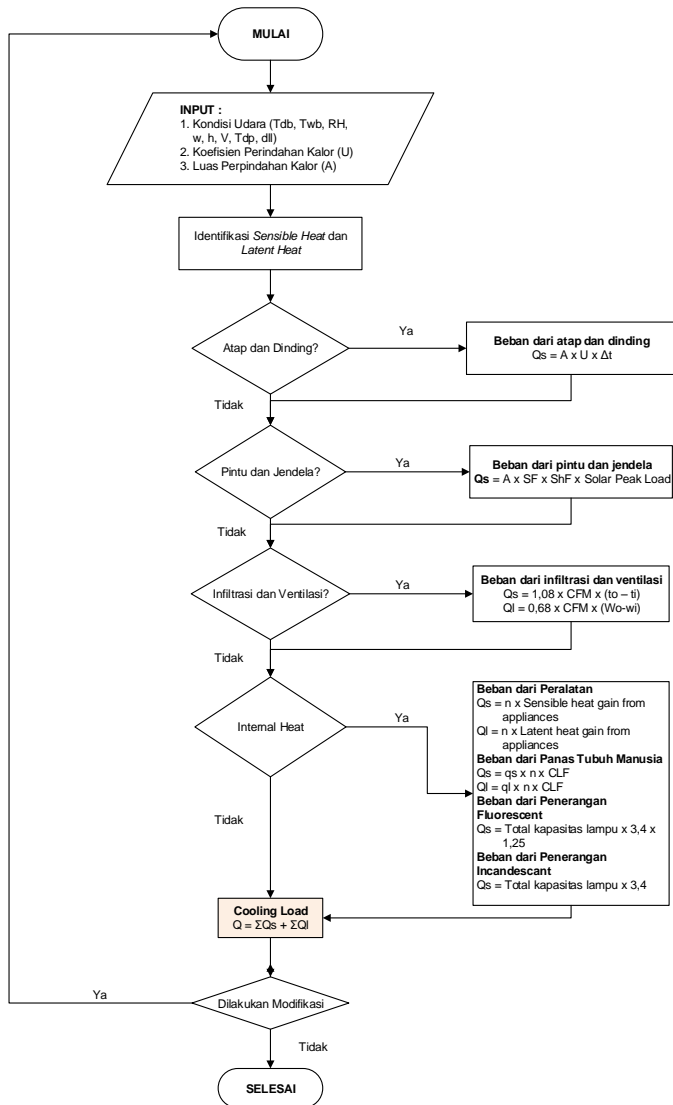
Beban Eksternal				
Jenis Beban	Material	Tebal		Konduktivitas
		mm	ft	Btu/h.ft.F
Dinding	Corten steel SPA-C	2	0,0065617	7,28
	GFRP	2	0,0065617	0,021
	Celah udara	20	0,0656168	
	Rock wool	10	0,0328084	0,039
Atap	Corten steel SPA-C	2	0,0065617	7,28
	GFRP	2	0,0065617	0,021
	Celah udara	20	0,0656168	
	Rock wool	10	0,0328084	0,039
Lantai	Corten steel SPA-C	1,2	0,003937	7,28
	Unitex	3,25	0,0106627	
	Lenoleum	2,5	0,0082021	
Kaca	Tempered laminasi (kegelapan 60%)	14,14	0,0463911	
Beban Internal				
Jenis Beban		Jumlah	Daya	
			(Watt)	
Penumpang		25	-	
Lampu Fluorescent		4	820	
Dispenser		1	250	
Monitor <i>meeting room</i>		6	60	
Monitor cctv		1	90	
Komputer		1	120	

3.2.2 Data Sekunder

Pada saat perancangan, kondisi lingkungan (temperatur dan RH) diasumsikan pada kondisi terpanas kota Makassar di bulan Desember 2016. Data sekunder yang digunakan dalam perancangan ini adalah sebagai berikut:

- Temperatur indoor : 75,2°F (24°C)
- Temperatur outdoor : 92,12°F (33,4°C)
- RH indoor : 50%
- RH outdoor : 70%
- Distribusi udara dalam gerbong : 50 fpm (0,25 m/s)

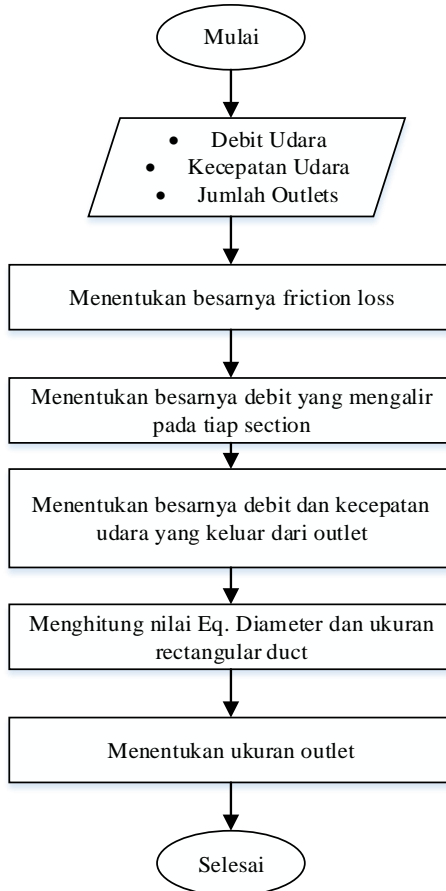
3.3 Diagram Alir Perhitungan Beban Pendinginan



Gambar 3.2 Diagram alir perhitungan *cooling load*

3.3 Perhitungan Ukuran Saluran Udara

Perancangan saluran udara menggunakan metode *equal friction*, Metode ini digunakan karena kemudahan dalam penggunaannya, dan cukup memuaskan untuk diterapkan pada sistem yang memiliki jarak antara outlet pertama dengan outlet terakhir relatif dekat. (Pita, 1989).



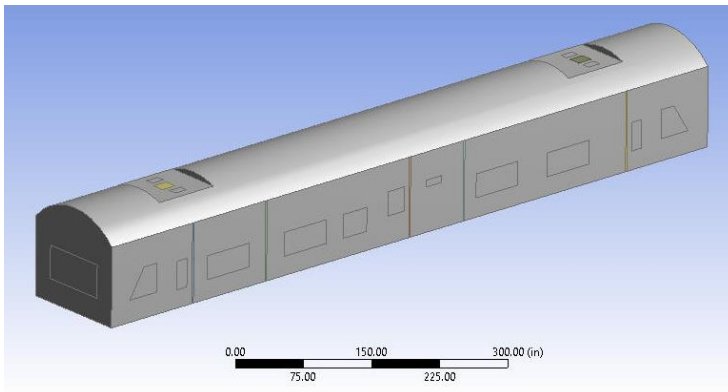
Gambar 3.3 Diagram alir perhitungan saluran udara

3.4 Simulasi CFD

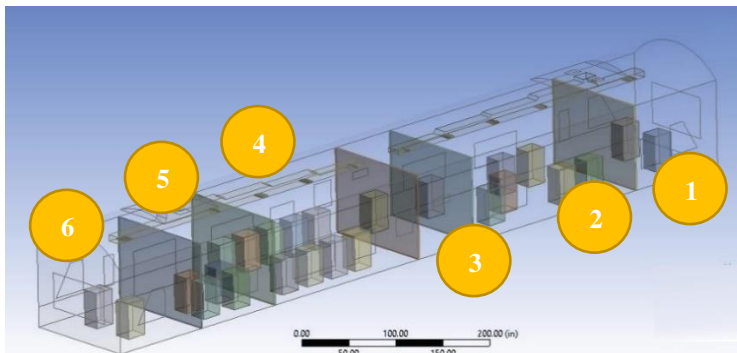
Desain simulai yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi tekanan dan kecepatan pada saluran udara serta distribusi temperatur pada Kereta Ukur Sulawesi.

3.4.1 *Pre-Processing*

Tahapan ini dimulai dengan pembuatan geometri kereta dan saluran udara dengan menggunakan *desain modeler*.



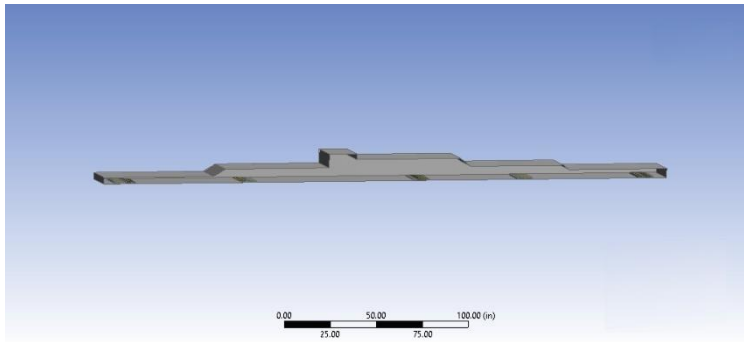
Gambar 3.4 Geometri kereta ukur



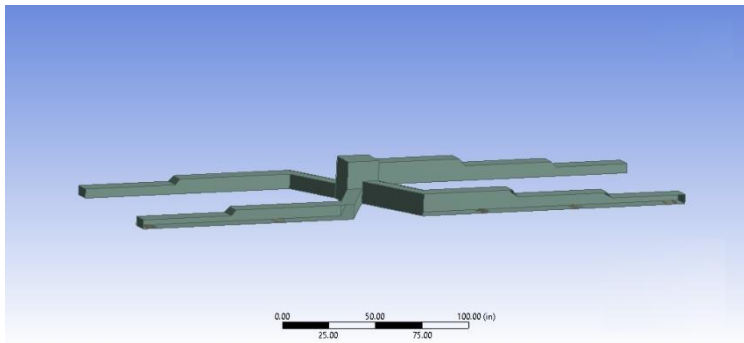
Gambar 3.5 Interior kereta ukur

keterangan gambar:

1. Ruang masinis depan
2. *Control room*
3. Kamar kecil (toilet)
4. *Meeting room*
5. *Inspection room*
6. Ruang masinis belakang



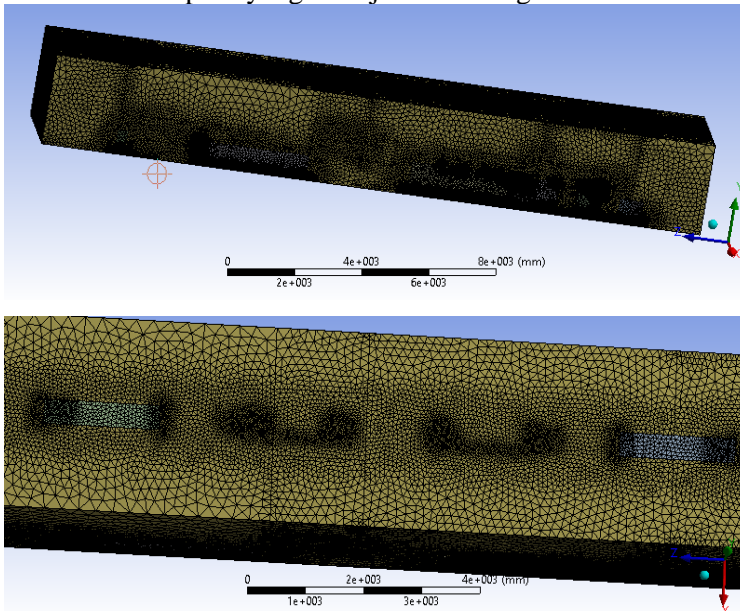
(a)



(b)

Gambar 3.6 Geometri saluran udara lurus (a) dan bercabang (b)

Selanjutnya dilakukan *meshing* geometri dengan menggunakan model *Tetrahedral*. Model *Tetrahedral* dipilih karena sesuai dengan bentuk geometri yang telah dibuat. Pada saat melakukan *meshing*, masing-masing elemen dikondisikan dengan menggunakan *element sizing* pada *face* dan *edge*. Hal itu dilakukan untuk mencegah lapisan batas (*boundary layers*) yang telah dibuat menjadi hilang karena diperhalus secara otomatis jika menggunakan *mesh volume*. Sehingga didapatkan bentuk mesh seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.8.



Gambar 3.7 *Meshing* pada badan kereta

3.7.2 Solver

Sebelum mulai melakukan set-up, dilakukan pengecekan pada kualitas *meshing*. Lalu didapatkan bahwa kualitas *meshing* masuk dalam kategori *acceptable*. Pada solver tahapan yang dilakukan berupa perhitungan iterasi dengan parameter

yang tercantum pada tabel 3.2 yang telah ditentukan sebelumnya.

Tabel 3. 2 *Parameter Set-up*

Parameter	Jenis
Viscous Model	<ul style="list-style-type: none"> • K-e standard wall function
Model Geometri	3 D
Keadaan	Steady
Material Properties	<ul style="list-style-type: none"> • Fluid : Air • Solid : Steel, glass, human

Tabel 3. 3 *Input Boundary Conditions*

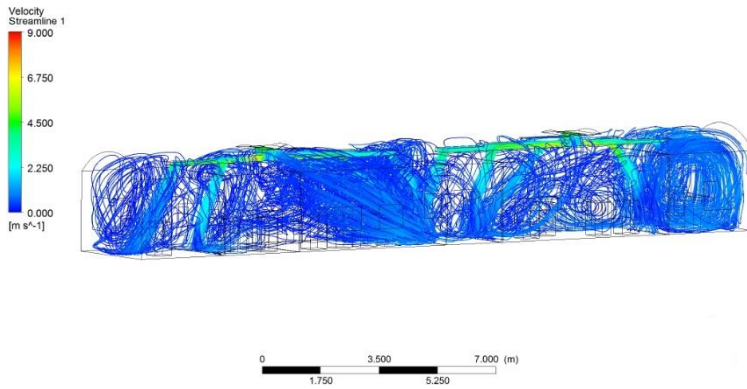
Entitas	Tipe Kondisi Batas	Input Data
Dinding Belakang	Wall	Heat flux: 12,85 btu/hr.ft2
Dinding Depan	Wall	Heat flux: 6,36 btu/hr.ft2
Dinding Kanan	Wall	Heat flux: 10,86 btu/hr.ft2
Dinding Kiri	Wall	Heat flux: 13,93 btu/hr.ft2
Atap	Wall	Heat flux: 13,21 btu/hr.ft2
Lantai	Wall	Heat flux: 4,52 btu/hr.ft2
Jendela Belakang	Wall	Heat flux: 125,33 btu/hr.ft2

Tabel 3. 4 *Input Boundary Conditions* (lanjutan)

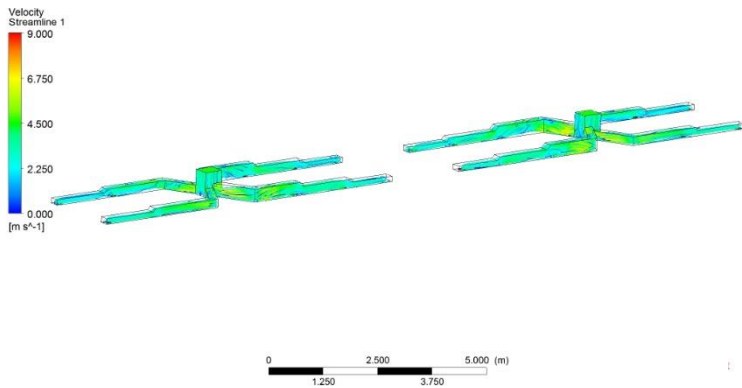
Entitas	Tipe Kondisi Batas	Input Data
Jendela Depan	Wall	Heat flux: 22,86 btu/hr.ft ²
Jendela Kanan	Wall	Heat flux: 111,91 btu/hr.ft ²
Jendela Kiri	Wall	Heat flux: 72,67 btu/hr.ft ²
Penumpang	Wall	T: 80,6 F
Inlet	Velocity inlet	V: 900 fpm T: 57,2 F
Outlet	Pressure outlet	T: 75,2 F

3.7.2 *Post-Processing*

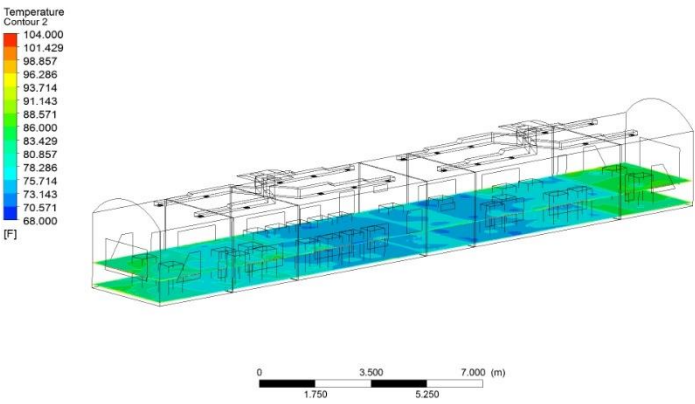
Tahapan ini merupakan hasil dari perhitungan iterasi simulasi yang telah dilakukan. Data disajikan dalam bentuk kontur kecepatan dan temperatur, *streamline*, dan grafik. *Streamline* digunakan untuk melihat aliran udara dari saluran udara masuk ke dalam gerbong. Kontur temperatur diambil melalui irisan horizontal pada ketinggian setara kepala manusia saat duduk (-/+ 1 m dari lantai) dan pada ketinggian setara kaki (-/+ 0,1 m dari lantai). Untuk kontur temperatur diamati pada irisan horizontal di sekitar kepala. Dari kontur tersebut, selanjutnya diplot dalam bentuk grafik.



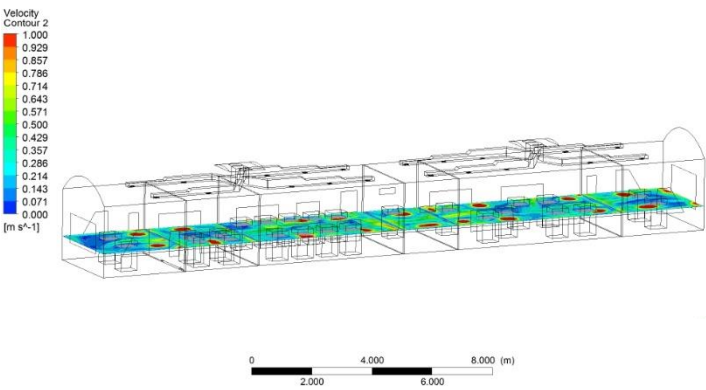
Gambar 3.8 *Streamline* distribusi aliran udara pada kereta ukur Sulawesi



Gambar 3.9 *Streamline* distribusi aliran udara pada saluran udara



Gambar 3.10 Kontur temperatur pada kereta ukur



Gambar 3.11 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Beban Pendinginan

Perhitungan beban pendinginan pada Kereta Ukur Sulawesi mengacu pada data primer dan data sekunder yang ditampilkan pada bab 3. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan metode CLTD.

4.1.1 Koefisien Perpindahan Panas pada *CarBody*

Pada kondisi udara ideal, nilai properties udara luar dapat dicari dari tabel properties udara pada temperatur 92,12°F (306,4 K), maka didapatkan nilai-nilai sebagai berikut:

- $\rho = 0,071922 \text{ lbm/ft}^3$
- $\mu = 0,045400 \text{ lbm/ft.hr}$
- $k = 0,015463 \text{ Btu/hr.ft.}^\circ\text{F}$
- $Pr = 0,705788$

Nilai properties udara tersebut dimasukkan pada persamaan 4.1 untuk menghitung besarnya *Reynolds Number*.

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{V \cdot \rho \cdot l}{\mu} \\
 &= \frac{328084 \frac{ft}{hr} \cdot 0,071922 \frac{lbm}{ft^3} \cdot 74,08136 ft}{0,04540 \frac{lbm}{ft.hr}} \\
 &= 3,85 \times 10^7
 \end{aligned}$$

Dengan nilai Re sebesar $3,85 \times 10^7$, maka aliran dikatakan turbulen. Sehingga untuk mencari nilai Nusselt Number dapat menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 \overline{Nu} &= Pr^{1/3} (0,037 Re^{0,8} - 871) \\
 &= 0,705788^{\frac{1}{3}} ((0,037 (3,85 \times 10^7)^{0,8} - 871)) \\
 &= 37783,552
 \end{aligned}$$

Nilai *Nusselt Number* tersebut dimasukkan kedalam persamaan untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi.

$$\begin{aligned}
 h_o &= \frac{Nu \cdot k}{l} \\
 &= \frac{37783,552 \cdot 0,015463 \frac{Btu}{hr \cdot ft \cdot ^\circ F}}{74,08136 ft} \\
 &= 7,886559 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}
 \end{aligned}$$

Sehingga koefisien perpindahan kalor menyeluruh pada *carbody* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

- $k_{Corten\ steel} = 7,28 \text{ Btu/hr.ft.F}$
- $R_{Celah\ Udara} = 0,852 \text{ hr.ft}^2\text{.F/Btu}$
- $k_{Rock\ Wool} = 0,039 \text{ Btu/hr.ft.F}$
- $k_{GFRP} = 0,021 \text{ Btu/hr.ft.F}$
- $h_{i\text{Udara Dalam}} = 0,68 \text{ Btu/hr.ft.F}$

$$\begin{aligned}
 U_{CB} &= \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{\Delta x_{CS}}{k_{CS}} + R_{CU} + \frac{\Delta x_{RW}}{k_{RW}} + \frac{\Delta x_{GFRP}}{k_{GFRP}} + \frac{1}{h_i}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{7,886} + \frac{0,006}{7,28} + 0,852 + \frac{0,032}{0,039} + \frac{0,006}{0,021} + \frac{1}{0,68}} \\
 &= 0,277471 \frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}
 \end{aligned}$$

4.1.2 Beban Akibat Konduksi Dinding

Dengan menggunakan persamaan 2.2 dan keadaan lingkungan T indoor sebesar 75,2 F dan T outdoor sebesar 92,12 F, maka besarnya beban konduksi pada dinding dapat ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Beban Akibat Konduksi pada Dinding

CLTD	LM	K	CLTD corr	Udinding	A	Q
F	F		F	Btu/hr.ft ² .F	ft ²	Btu/hr
55	-10	0,65	39,17	0,277471	376,37	4090,59
72	-10	0,65	50,22	0,277471	376,37	5244,56
26	-6	0,65	22,92	0,277471	28,23	179,55
46	10	0,65	46,32	0,277471	28,23	362,86
Total						9877,57

4.1.3 Beban Akibat Konduksi Atap

Beban akibat konduksi atap dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2 dengan kondisi lingkungan T indoor sebesar 75,2 F dan T outdoor sebesar 92,12 F. Sehingga didapatkan beban sebesar 7478,48 Btu/hr.

4.1.4 Beban Akibat Konduksi Lantai

Beban akibat konduksi lantai dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.5 dengan kondisi lingkungan T indoor sebesar 75,2 F dan T outdoor sebesar 92,12 F. Hasil perhitungan besarnya beban konduksi pada lantai ditunjukkan oleh tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Beban Konduksi pada Lantai

h ₀	h _i	U _{lantai}	TD	A	Q
Btu/hr.ft.F	Btu/hr.ft.F	Btu/hr.ft ² .F	F	ft ²	Btu/hr
7,886	0,68	0,386	11,7	565,987	2558,82

4.1.5 Beban Konduksi pada Kaca Jendela

Beban akibat konduksi pada kaca jendela dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3 dengan kondisi lingkungan T indoor sebesar 75,2 F dan T outdoor sebesar 92,12 F. Hasil perhitungan besarnya beban konduksi pada kaca jendela ditunjukkan oleh tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Beban Konduksi pada Kaca Jendela

CLTD	CLTD corr	Bagian	A	Ukaca	Q
F	F		ft ²	Btu/hr.ft ² .F	Btu/hr
148	157,92	kanan	65,1538	0,3864	3975,81
156	165,92	kiri	65,1538	0,3864	4177,22
35	44,92	depan	26,1126	0,3864	453,25
79	88,92	belakang	26,1126	0,3864	897,22
Total					9503,49

4.1.6 Beban Radiasi pada Kaca Jendela

Beban akibat radiasi pada kaca jendela dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4. Hasil perhitungan besarnya beban radiasi pada kaca jendela ditunjukkan oleh tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Beban Radiasi pada Kaca Jendela

Bagian	SC	A	CLF	SHGF	Q
		ft ²		Btu/hr.ft ²	Btu/hr
Kanan	0,58	65,1538	0,65	135	3316,00
Kiri	0,58	65,1538	0,82	18	557,76
Depan	0,58	26,1126	0,51	18	139,03
Belakang	0,58	26,1126	0,62	253	2375,69
Total					6388,51

4.1.7 Beban Penumpang

Beban akibat penumpang terbagi menjadi dua macam, yaitu beban sensibel dan beban laten. Beban sensibel dari penumpang didapatkan sebesar 5750 Btu/hr. Sedangkan beban latennya adalah sebesar 4625 Btu/hr.

4.1.8 Beban Penerangan

Sistem penerangan pada Kereta Ukur Sulawesi menggunakan lampu fluoresen (*fluorescent light*). Beban akibat penerangan didapatkan sebesar 13940 Btu/hr.

4.1.9 Beban Peralatan

Beban akibat peralatan yang terdapat dalam Kereta Ukur Sulawesi ditunjukkan oleh tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Beban Peralatan

Jenis	Jumlah	Daya	Q
		Watt	Btu/hr
Dispenser	1	250	850
Monitor cctv	6	60	1224
Monitor MR	1	90	306
Komputer	1	120	408
Total			2788

4.1.10 Beban Infiltrasi

Beban akibat infiltrasi yang terdapat dalam Kereta Ukur Sulawesi berasal dari 2 jenis beban, yaitu beban sensibel dan beban laten. Besarnya beban sensibel dari infiltrasi adalah 1762,87 Btu/hr. Sedangkan beban latennya adalah sebesar 6174,9 Btu/hr.

4.1.11 Beban Ventilasi

Beban akibat ventilasi yang terdapat dalam Kereta Ukur Sulawesi ditunjukkan oleh tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Beban Ventilasi

Jumlah Penumpang	CFM /orang	OASH	Woa	Wi	OALH
		Btu/hr	gr/lb	gr/lb	Btu/hr
25	15	6979,50	161,227	65,354	24447,62

4.2 Perhitungan Udara Suplai

Dari perhitungan beban pendinginan yang telah dilakukan, didapatkan nilai beban-beban sebagaimana

ditunjukkan oleh tabel 4.7. Sehingga didapatkan beban total minimal yang harus ditanggung AC untuk mengkondisikan udara di dalam Kereta Ukur Sulawesi.

Tabel 4. 7 Beban-beban pada Kereta Ukur Sulawesi

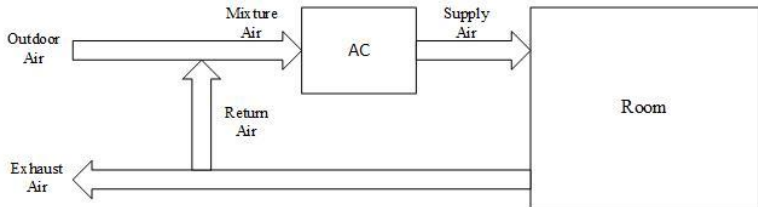
	Btu/hr	Kkal/hr	Watts	PK
RSHG	60047,74	15141,88	17598,26	6,67
RLHG	10799,92	2723,35	3165,14	1,20
RSHGk	63050,13	15898,97	18478,17	7,01
RTHG	70847,66	17865,23	20763,40	7,87
RTHGk	74390,04	18758,49	21801,57	8,27
OASH	6979,50	1759,98	2045,49	0,78
OALH	24447,62	6164,81	7164,89	2,72
OASHk	7328,48	1847,98	2147,76	0,81
OATHk	31776,09	8012,79	9312,65	3,53
GTH	106166,13	26771,28	31114,22	11,80

Nilai beban tersebut merupakan nilai pembebanan pada Kereta Ukur Sulawesi. Pada kereta tersebut dipasang 2 buah AC, sehingga nilai pembebanan yang ditanggung oleh 1 unit AC ditunjukkan pada tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Beban pada 1 AC

1 AC	Btu/hr	Kkal/hr
RSHG	31525,06	7949,49
RLHG	5669,96	1429,76
OASH	3664,24	923,99
OALH	7334,28	1849,44
TSH	35189,30	8873,48
TLH	13004,24	3279,20

Sistem pendistribusian udara pada Kereta Ukur Sulawesi adalah pengkondisian udara dengan menggunakan *mixture air* sebagaimana diilustrasikan oleh gambar 4.1.



Gambar 4.1 Skema *mixture air*

Supply udara berperan penting dalam proses pendinginan ruangan. Temperatur supply udara biasanya dapat ditentukan terlebih dahulu sehingga beda temperature udara antara ruangan dan supply berkisar 15-30°F. Dalam hal ini, diasumsikan beda temperatur udara sebesar 18°F. (Ardiyanto, 2008)

$$T_R - T_S = 18^\circ\text{F}$$

$$T_S = 75,2 - 18 = 57,2^\circ\text{F}$$

Sehingga besarnya debit udara supply dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned}
 CFM_s &= \frac{RSHG}{1,1 \times (T_R - T_S)} \\
 &= 1592,17 \text{ ft}^3/\text{min} \\
 &= 1600 \text{ ft}^3/\text{min}
 \end{aligned}$$

Debit udara tersebut adalah debit udara supply yang dibutuhkan oleh 1 AC. Jika Kereta Ukur menggunakan 2 buah AC, maka besarnya debit udara supply yang dibutuhkan adalah:

$$CFM_{2S} = 2 \times 1600 = 3200 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Kebutuhan ventilasi (udara luar) pada Kereta Ukur Sulawesi diketahui sebesar 94,72 ft³/min. Untuk mendapatkan besarnya debit udara balik (*return air*), dapat menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} CFM_{RA} &= CFM_S - CFM_{OA} \\ &= 1497,46 \text{ ft}^3/\text{min} \end{aligned}$$

Dari data tersebut, maka dapat digunakan untuk menghitung temperatur udara campuran dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{(CFM_{OA} \times T_{OA}) + (CFM_{RA} \times T_R)}{CFM_S} \\ &= 76,21^\circ\text{F} \end{aligned}$$

Selain itu juga dapat digunakan untuk menghitung rasio kelembapan (*humidity ratio*) untuk udara campuran dengan menggunakan persamaan

$$W_m = \frac{(CFM_{OA} \times W_{OA}) + (CFM_{RA} \times W_R)}{CFM_S} = 71,06 \text{ gr/lb}$$

4.3 Pemilihan AC

Kereta Ukur Sulawesi menggunakan 2 AC sentral dengan model roof mount (AC diletakkan pada bagian atap). Hal ini dilakukan karena penempatan AC pada bagian luar dapat meminimalisir gangguan suara yang ditimbulkan oleh mesin AC. Dengan beban pendinginan sebesar 106166,13 Btu/hr atau sebesar 26771,28 Kkal/hr, maka masing-masing AC akan menanggung beban minimal sebesar 53083,07 Btu/hr atau 13385.64 Kkal/hr. Sehingga, referensi AC yang dapat dipilih untuk Kereta Ukur Sulawesi memiliki spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Spesifikasi AC Toshiba RPU-6035V

Item	Performansi	Deskripsi
<i>AC main circuit</i>	3 phase 380V AC, 50 Hz	
<i>Control circuit</i>	1 phase 220V AC, 50 Hz	
<i>Air Conditioning Capacity</i>	17,5 kW (15000 kkal/hr)	<i>Condenser coil inlet air temperatur: 35 C</i> <i>Evaporator coil inlet air temperatur: 26 C</i>
<i>Air Flow Rate</i>	140 m3/min/unit	
<i>Total operation current</i>	15,34 A	
<i>Total input power</i>	7,84 kW	
<i>Refrigerant</i>	1,5kg/cycle	R-407C
<i>Unit mass total</i>	310 kg	

Pemilihan mesin AC didasarkan pada besarnya kapasitas pendinginan mesin AC, debit udara, serta jenis refrigerant yang digunakan. Pemilihan jenis AC tidak mempertimbangkan merk, *reliability*, maupun faktor ekonomis dari AC tersebut.

4.4 Perhitungan Ukuran Saluran Udara

Perancangan saluran udara dilakukan dengan menggunakan metode *equal friction*. Hasil perhitungan dengan metode tersebut ditampilkan pada tabel 4.10 dan 4.11.

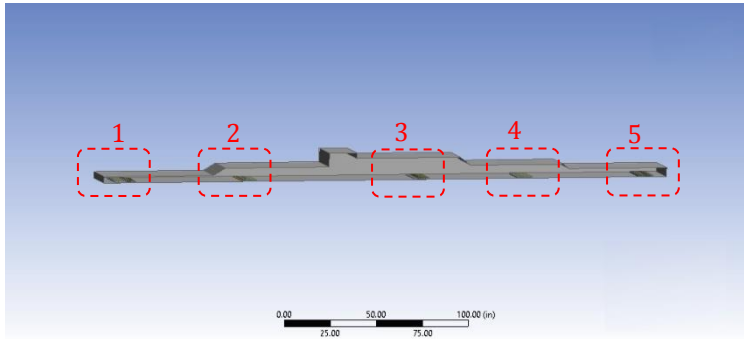
Tabel 4. 10 Ukuran Saluran Udara Lurus

<i>Section</i>	<i>Airflow (ft³/min)</i>	<i>Velocity (ft/min)</i>	<i>Diameter (in)</i>	<i>Rect. Size (in)</i>	<i>Friction Loss (in.w.per 100 ft)</i>
0	1600	900	18,0	16x16	0,067
0 - 2	700	750	13,2	9x16	0,067
0 - 3	900	800	15,1	12x16	0,067
2 - 1	400	650	10,8	6x16	0,067
3 - 4	600	700	12,4	7.5x16	0,067
4 - 5	300	600	9,6	5x16	0,067

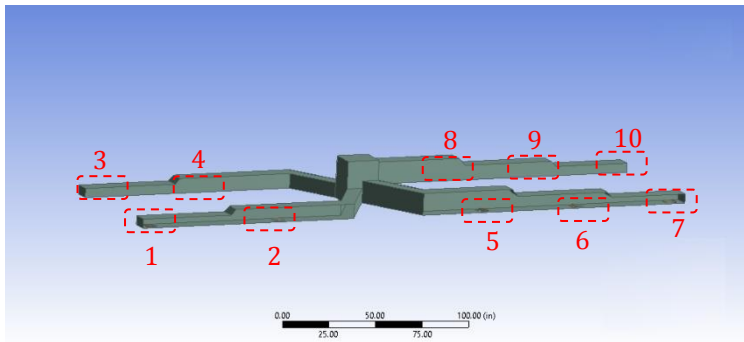
Tabel 4. 11 Ukuran Saluran Udara Bercabang

<i>Section</i>	<i>Airflow (ft³/min)</i>	<i>Velocity (ft/min)</i>	<i>Diameter (in)</i>	<i>Rect. Size (in)</i>	<i>Friction Loss (in.w.per 100 ft)</i>
0	1600	900	18,0	15x18	0,067
0-2	320	600	9,8	8x10	0,067
2-1	160	500	7,6	5x10	0,067
0-4	320	600	9,8	8x10	0,067
3-4	160	500	7,6	5x10	0,067
0-5	480	680	12,0	12x10	0,067
5-6	320	600	9,8	8x10	0,067
6-7	160	500	7,6	5x10	0,067
0-8	480	680	12,0	12x10	0,067
8-9	320	600	9,8	8x10	0,067
9-10	160	500	7,6	5x10	0,067

Desain saluran udara dengan menggunakan perhitungan diatas, ditampilkan pada gambar 4.2.



(a)

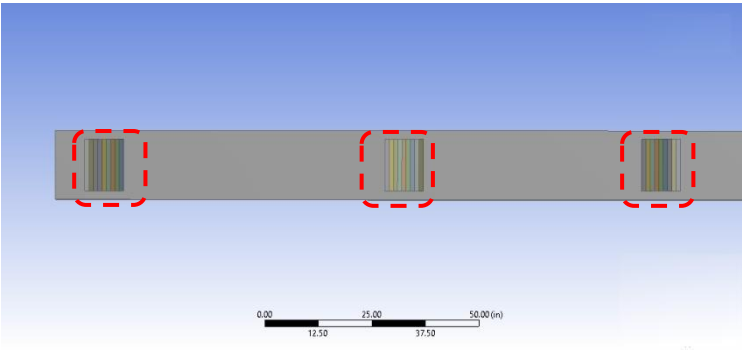


(b)

Gambar 4.2 Desain saluran udara (a) lurus dan (b) bercabang

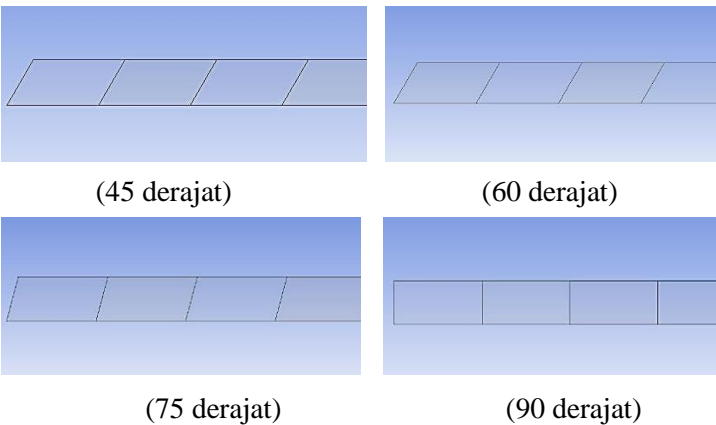
Desain saluran udara lurus memiliki 5 lubang keluaran dengan ukuran 12 inch x 12 inch untuk lubang yang mengeluarkan debit udara 400 ft³/min dan ukuran 12 inch x 9 inch untuk lubang yang mengeluarkan debit udara sebesar 300 ft³/min. Sedangkan saluran udara yang bercabang memiliki 10

lubang keluaran, dengan ukuran lubang udara 5 inch x 6 inch untuk lubang yang mengeluarkan debit sebesar 160 ft³/min.



Gambar 4.3 Bentuk lubang udara

Pada masing-masing lubang udara dilengkapi dengan pengarah atau disebut *grill* sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.4.



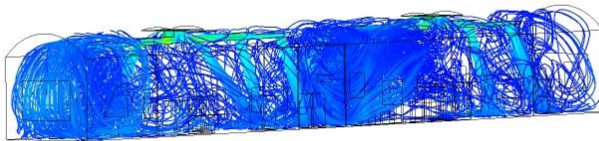
Gambar 4.4 Bentuk pengarah pada lubang udara

4.5 Hasil Simulasi

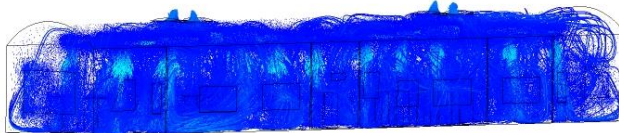
Hasil simulasi CFD ditampilkan dalam bentuk kontur temperatur dan kecepatan, streamline, serta dalam bentuk grafik.

4.5.1 Hasil *Streamline*

Streamline di tampilkan untuk mengetahui distribusi aliran udara dari saluran udara ke dalam badan kereta. Pada gambar 4.5 dan 4.6 ditampilkan hasil streamline untuk saluran udara lurus dan bercabang dengan variasi sudut pengarah 75 derajat.



Gambar 4.5 *Streamline* pada saluran udara lurus dengan variasi sudut pengarah 75 derajat



Gambar 4.6 *Streamline* pada saluran bercabang dengan variasi sudut pengarah 75 derajat

Dari hasil *streamline* dapat dilihat bahwa aliran udara dari saluran udara ke dalam kereta terdistribusi secara menyeluruh ke dalam setiap ruangan di kereta. Namun, pada saluran bercabang, aliran udara nampak lebih merata. Hasil *streamline* untuk variasi lainnya ditampilkan pada lampiran A.

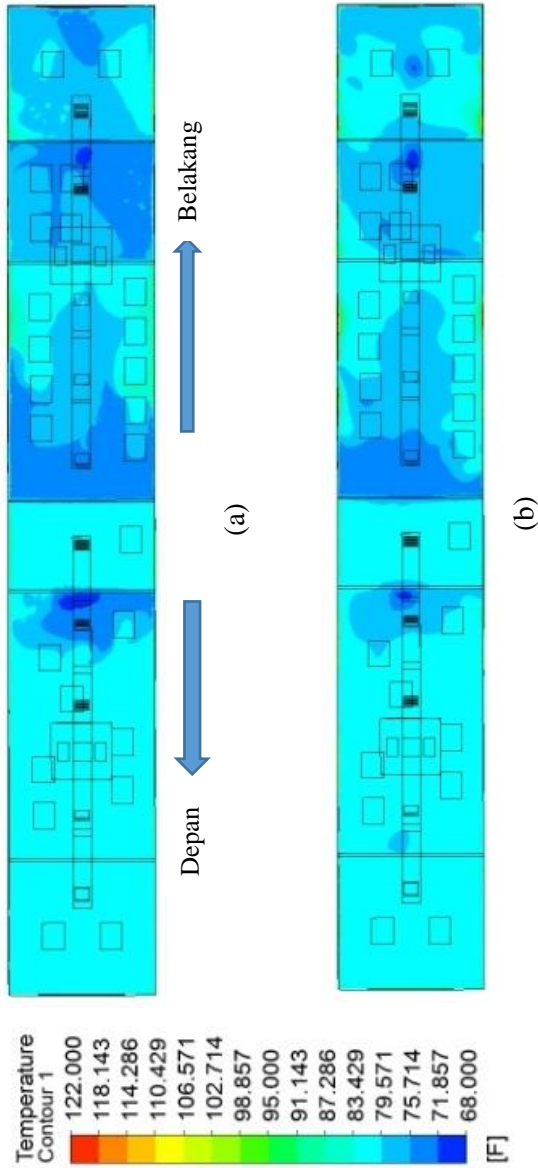
4.5.2 Distribusi Temperatur pada Kereta Ukur Sulawesi

Distribusi temperatur di Kereta Ukur Sulawesi ditampilkan dalam kontur yang terbagi menjadi 2 irisan melintang, yaitu pada sekitar kaki penumpang dengan ketinggian 0,1 meter dari lantai dan pada sekitar kepala penumpang dalam keadaan duduk dengan ketinggian 1 meter dari lantai. Hasil kontur tersebut selanjutnya diplot dalam bentuk grafik distribusi temperatur dengan menggunakan 21 titik acuan yang memiliki jarak antar titik adalah sebesar 1 meter.

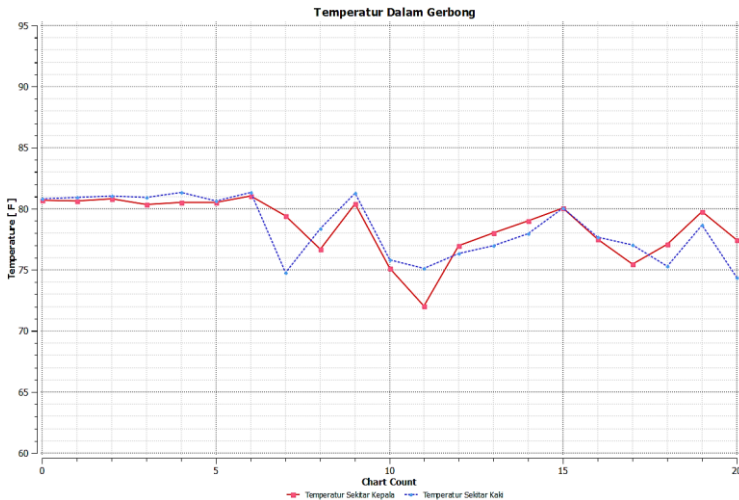
a. Saluran Udara Lurus dengan Sudut Pengarah Outlet 45°

Kontur temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah outlet sebesar 45 derajat ditunjukkan oleh gambar 4.7. Dari kontur tersebut dapat diketahui bahwa semakin ke arah belakang, temperatur udara di sekitar kepala maupun kaki semakin turun.

Kontur temperatur tersebut selanjutnya diplot dalam bentuk grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.8. Nampak dari grafik tersebut, nilai temperatur maksimum pada area sekitar kaki yaitu $81,321^\circ\text{F}$ yang ditunjukkan oleh titik 6. Titik 6 adalah titik yang terdapat pada *control room* bagian depan. Sedangkan nilai temperatur minimum berada di area sekitar kepala yakni sebesar $72,267^\circ\text{F}$. Nilai temperatur rata-rata untuk saluran udara lurus dengan sudut pengarah outlet 45° adalah sebesar $78,48^\circ\text{F}$



Gambar 4.7 Kontur temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara lurus 45 derajat

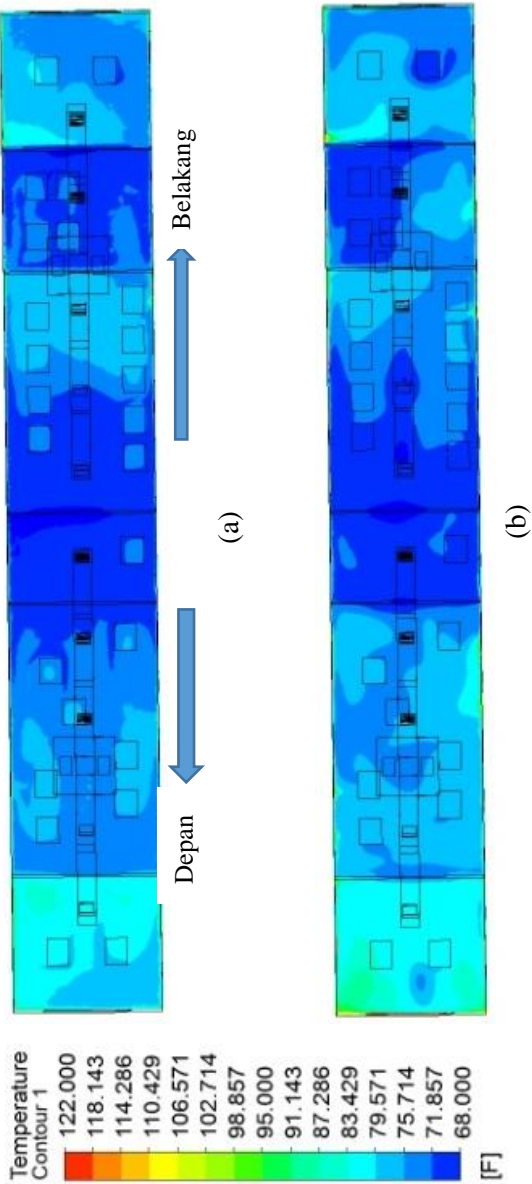


Gambar 4.8 Distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 45 derajat

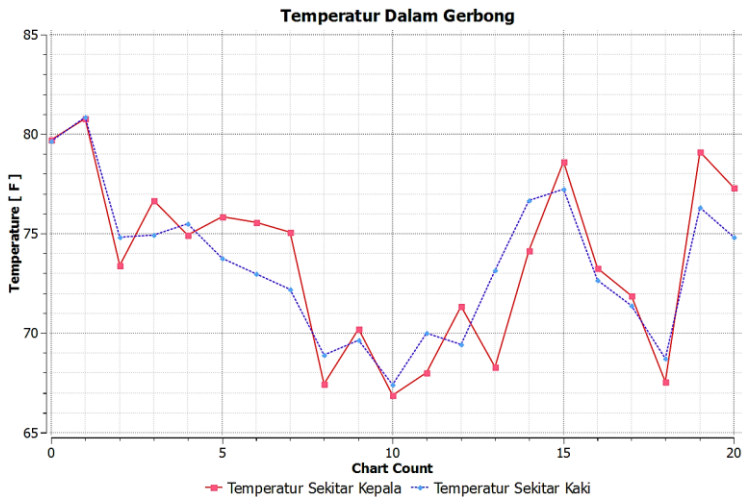
b. Saluran Udara Lurus dengan Sudut Pengarah Outlet 60°

Untuk variasi pengarah outlet 60 derajat, hasil kontur temperatur untuk daerah sekitar kepala dan kaki menunjukkan kecenderungan warna biru yang lebih tua jika dibandingkan dengan variasi 45 derajat. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur rata-rata di dalam kereta untuk variasi 60 derajat lebih rendah, yakni 73,5°F. Warna biru tua mendominasi bagian tengah kereta, yaitu di area ruang inspeksi, meeting room, dan kamar kecil.

Temperatur maksimum terdapat pada area sekitar kaki yaitu 80,846 °F yang ditunjukkan oleh titik 1 pada grafik 4.10. Titik 1 adalah titik yang terdapat pada ruang masinis depan. Sedangkan nilai temperatur minimum berada di area sekitar kepala yakni sebesar 66,896 °F yang berada di area kamar kecil.



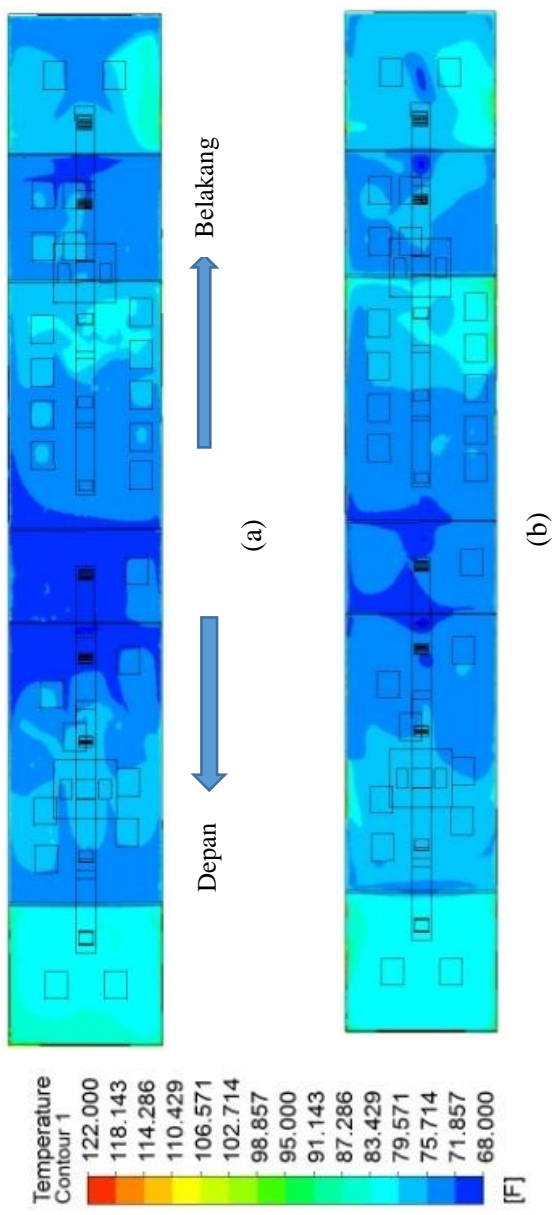
Gambar 4.9 Kontur distribusi temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara lurus 60 derajat



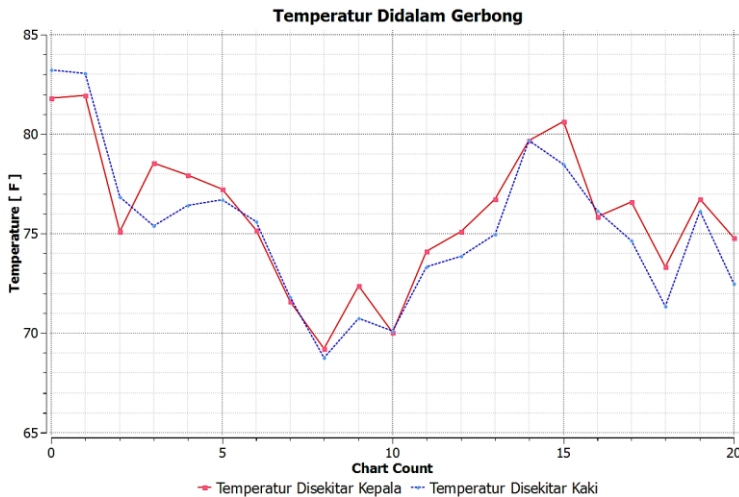
Gambar 4.10 Distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 60 derajat

c. Saluran Udara Lurus dengan Sudut Pengarah Outlet 75°

Pada variasi pengarah outlet 75 derajat temperatur rata-rata yang dihasilkan adalah sebesar 75,552°F. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.11, area tengah memiliki temperatur yang lebih rendah jika dibandingkan dengan area depan maupun belakang. Nilai temperatur maksimum terdapat pada ruang masinis depan, yaitu sebesar 83,220 °F. Sedangkan temperatur terendah berada pada area sekitar kaki di kamar kecil, yaitu 68,748 °F.



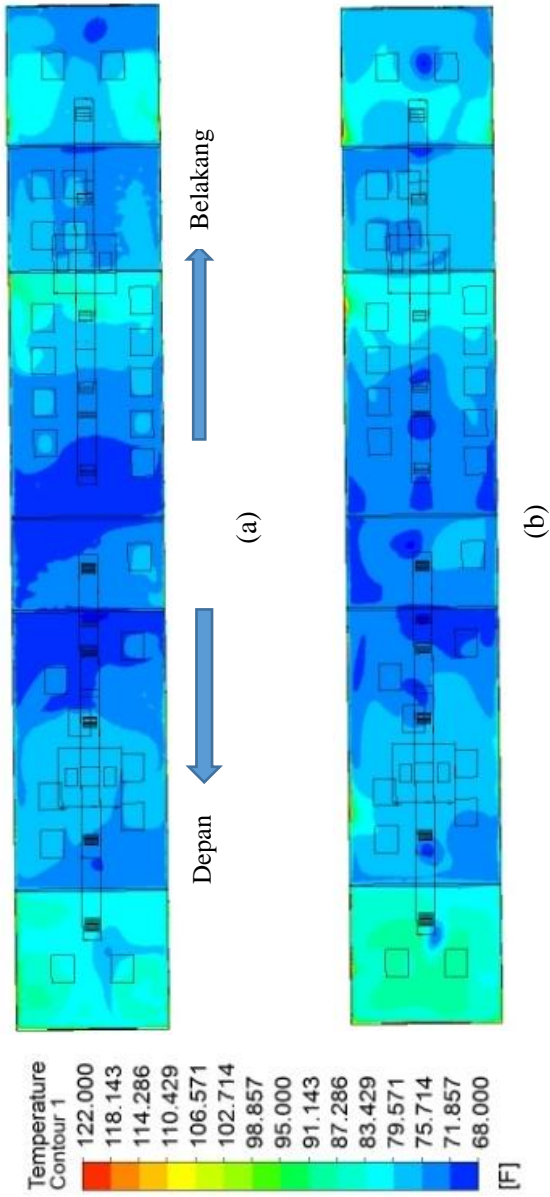
Gambar 4.11 Kontur distribusi temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara lurus 75 derajat



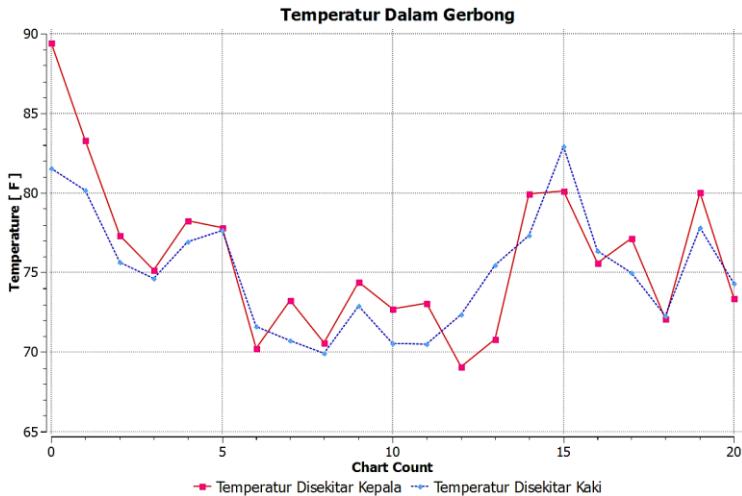
Gambar 4.12 Distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 75 derajat

d. Saluran Udara Lurus dengan Sudut Pengarah Outlet 90°

Distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah outlet sebesar 90 derajat ditunjukkan oleh gambar 4.13. Nilai temperatur maksimum terdapat pada area sekitar kepala pada ruang masinis depan yaitu 89,439 °F. Bagian depan kereta memang cenderung lebih panas karena pada kaca ruang masinis depan lebih banyak menerima radiasi matahari. Sedangkan nilai temperatur minimum berada di area sekitar kepala pada *meeting room* yakni sebesar 69,078°F. Temperatur rata-rata di dalam kereta adalah 76,533 °F.



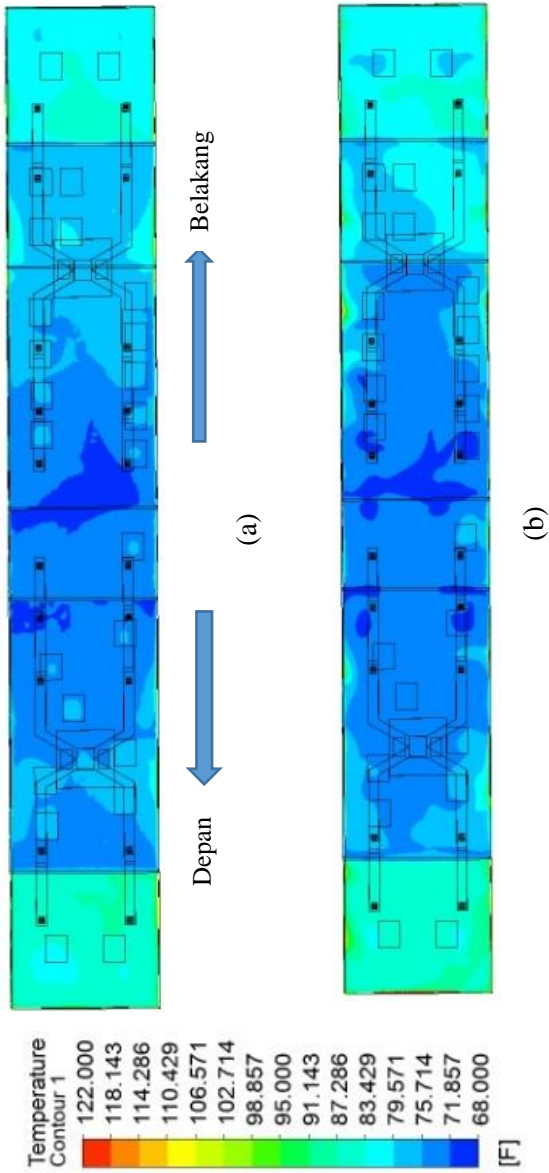
Gambar 4.13 Kontur temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara lurus 90 derajat



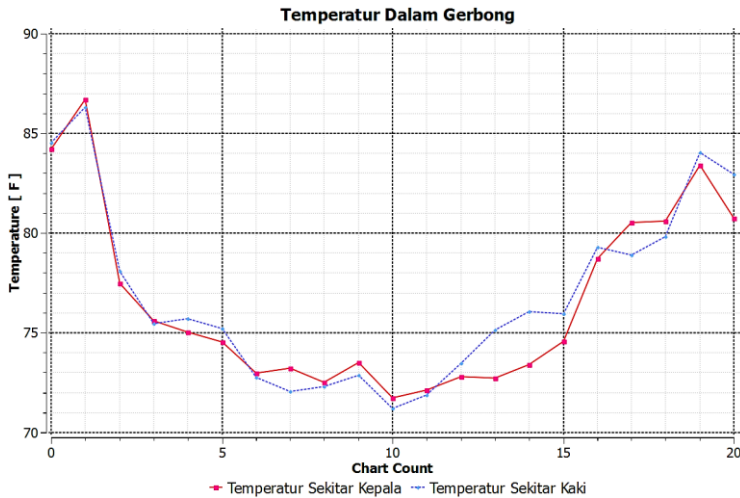
Gambar 4.14 Grafik distribusi temperatur pada variasi saluran udara lurus dengan pengarah 90 derajat

- e. Saluran Udara Bercabang dengan Sudut Pengarah Outlet 45°

Nilai temperatur rata-rata untuk saluran udara bercabang dengan sudut pengarah 45 derajat adalah 76,685°F. Jika dilihat dari gambar 4.15, pada ruangan masinis depan maupun belakang mempunyai temperatur yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan bagian tengah kereta.



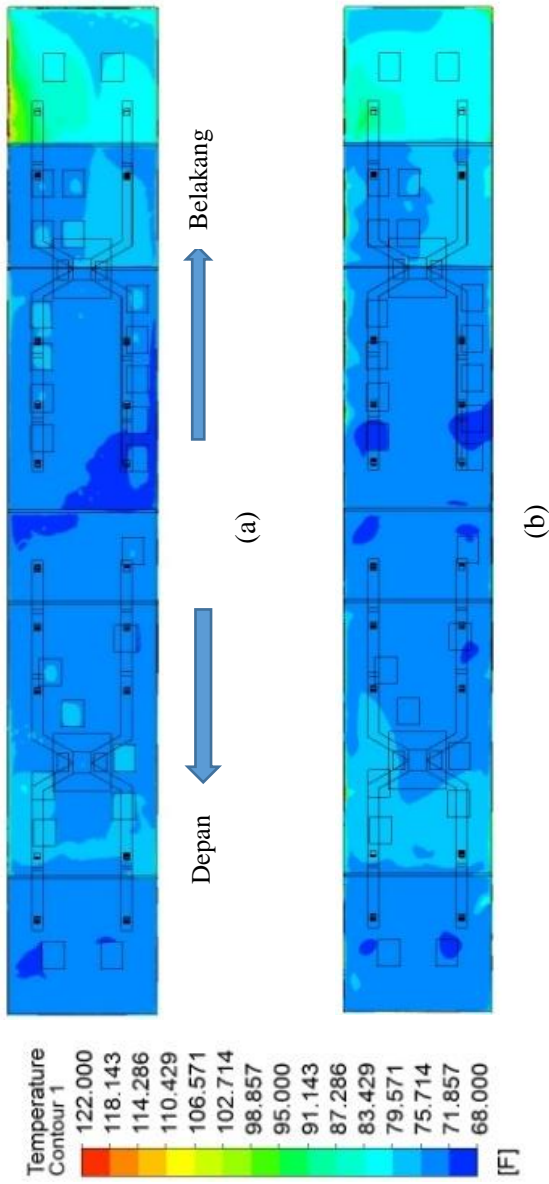
Gambar 4.15 Kontur temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara bercabang 45 derajat



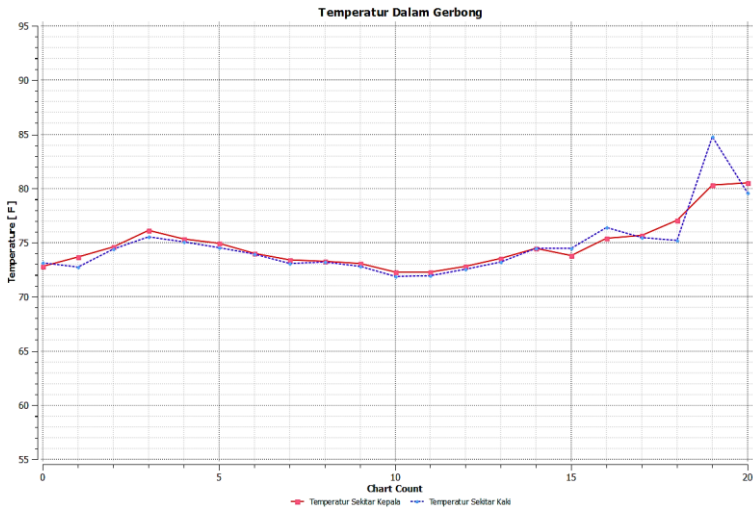
Gambar 4.16 Grafik disibusi temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 45 derajat

- f. Saluran Udara Bercabang dengan Sudut Pengarah Outlet 60°

Gambar 4.17 menunjukkan kontur temperatur untuk variasi saluran udara bercabang dengan pengarah outlet sebesar 60 derajat. Dari kontur tersebut dapat diketahui bahwa temperatur tertinggi terdapat pada bagian belakang kereta. Nilai temperatur maksimum terdapat di area sekitar kaki yaitu 84,741 °F pada ruang masinis belakang. Sedangkan nilai temperatur minimum berada di area sekitar kaki yakni sebesar 71,902 °F. Temperatur minimum tersebut adalah temperatur pada area kamar kecil.



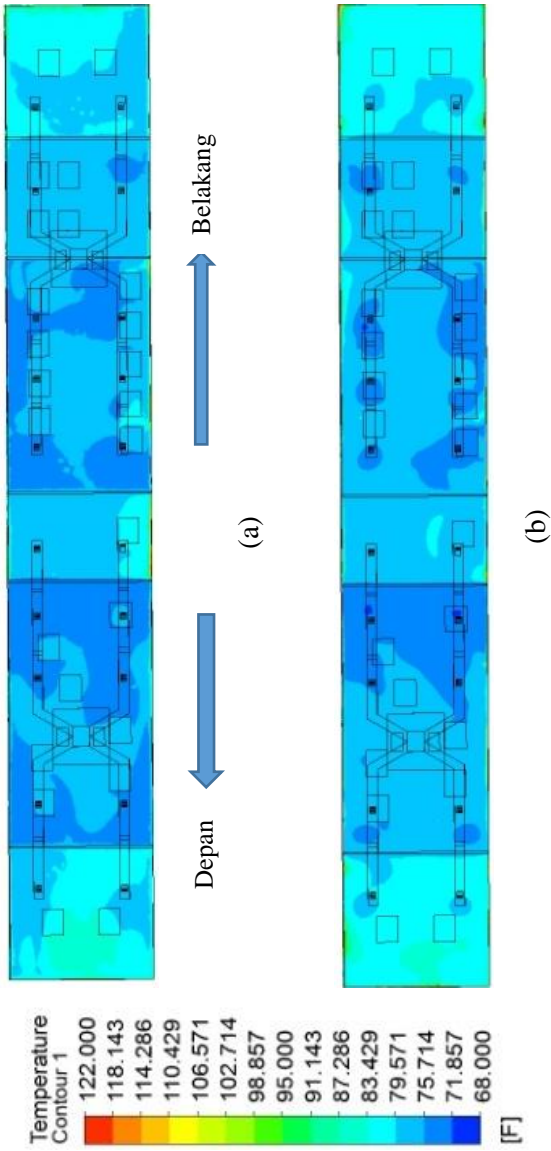
Gambar 4.17 Kontur temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara bercabang 60 derajat



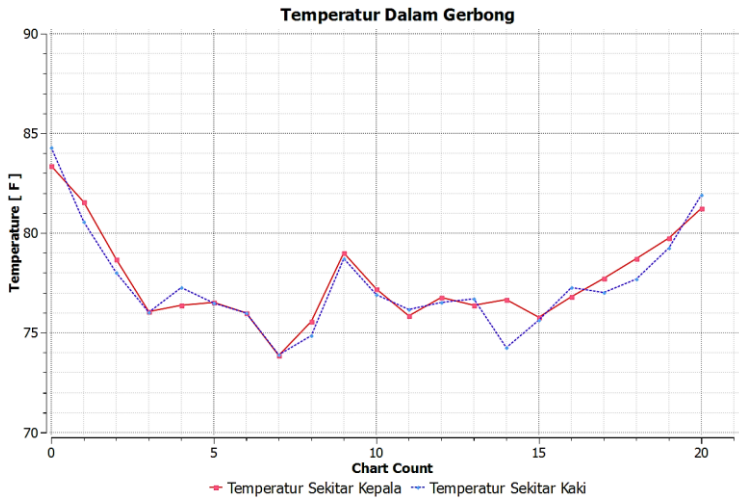
Gambar 4.18 Grafik distribusi temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 60 derajat

g. Saluran Udara Bercabang dengan Sudut Pengarah Outlet 75°

Pada saluran udara bercabang distribusi aliran udara di dalam kereta lebih merata jika dibandingkan dengan saluran udara lurus. Seperti yang terlihat pada gambar 4.19, warna kontur tidak menunjukkan gradasi warna yang kontras. Sehingga dapat dikatakan bahwa perbedaan temperatur maksimum dan temperatur minimumnya tidak terpaut jauh. Temperatur maksimum sebesar 84,332 °F terdapat pada area sekitar kaki di ruang masinis depan. Sedangkan temperatur minimum adalah 73,877 °F. Temperatur cenderung rendah pada bagian tengah kereta.



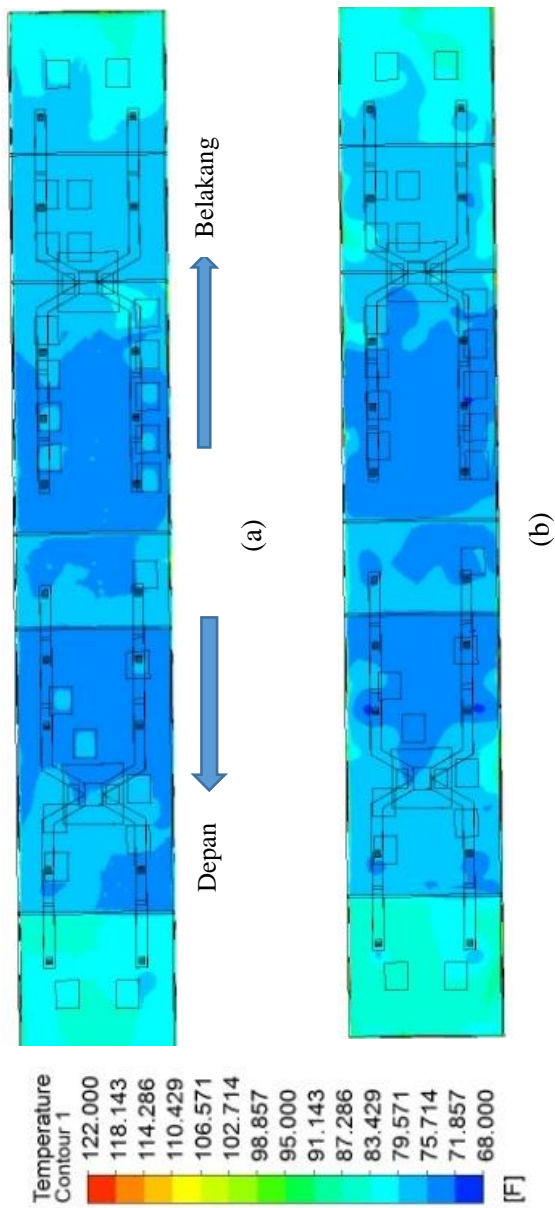
Gambar 4.19 Kontur temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara bercabang 75 derajat



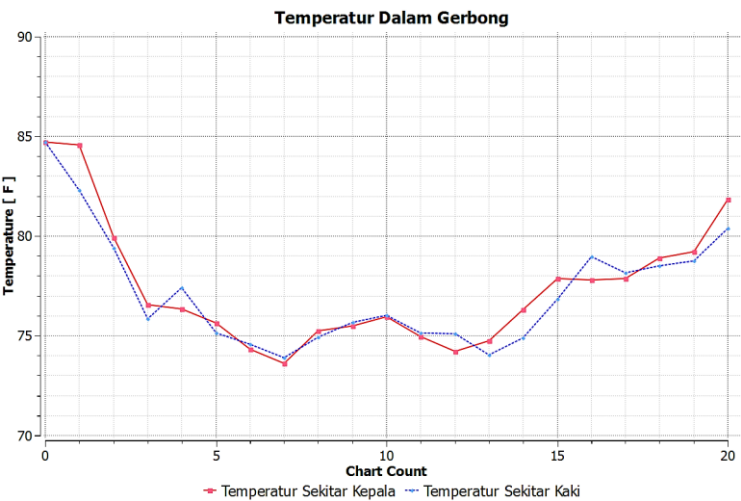
Gambar 4.20 Grafik distribusi temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 75 derajat

- h. Saluran Udara Bercabang dengan Sudut Pengarah Outlet 90°

Pada variasi pengarah outlet 90 derajat temperatur rata-rata yang dihasilkan adalah sebesar 77,305°F. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 4.21, area tengah memiliki temperatur yang lebih rendah jika dibandingkan dengan area depan maupun belakang. Nilai temperatur maksimum terdapat pada ruang masinis depan, yaitu sebesar 85,051 °F. Sedangkan temperatur terendah berada pada area sekitar kaki di kamar kecil, yaitu 73,78 °F



Gambar 4.21 Kontur distribusi temperatur (a) di sekitar kaki (b) di sekitar kepala pada saluran udara bercabang 90 derajat



Gambar 4.22 Grafik distribusi temperatur pada variasi saluran udara bercabang dengan pengarah 90 derajat

4.5.3 Hasil Distribusi Kecepatan Udara di Sekitar Kepala pada Kereta Ukur Sulawesi

Distribusi kecepatan udara didapat dari kontur *velocity* pada area sekitar kepala dengan ketinggian 1 meter dari lantai. Nilai kecepatan udara selanjutnya ditampilkan dalam bentuk tabel seperti yang ditunjukkan oleh tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Kecepatan Udara pada Saluran Udara Lurus

Jarak	Kecepatan			
	<i>fpm</i>			
<i>ft</i>	Sudut 45°	Sudut 60°	Sudut 75°	Sudut 90°
3,287	228,149	138,189	77,165	58,071
10,577	106,496	129,921	266,535	45,669
17,867	93,504	101,378	66,142	17,323
25,157	86,023	35,827	85,433	24,213
32,448	237,598	41,535	46,850	39,370
39,738	319,094	374,015	80,709	70,275
47,028	58,464	141,929	31,496	120,079
54,318	56,693	38,976	34,449	45,866
61,608	335,039	250,393	482,283	384,251
68,898	110,630	36,614	178,149	253,149
Rata-rata	163,169	128,878	134,921	105,827

Pada saluran udara lurus, kecepatan udara rata-rata di sekitar kepala berkisar antara 105,827 fpm hingga 163,169 fpm. Standar kecepatan udara di sekitar kepala yang direkomendasikan adalah tidak lebih besar dari 0,5 m/s atau setara dengan 98,425 fpm. Jika dilihat dari desain saluran udara lurus yang telah dibuat, semua desain tidak memenuhi persyaratan tersebut.

Tabel 4. 13 Kecepatan Udara pada Saluran Udara Bercabang

Jarak	Kecepatan			
	<i>fpm</i>			
<i>ft</i>	Sudut 45°	Sudut 60°	Sudut 75°	Sudut 90°
3,287	44,291	173,819	54,527	11,417
10,577	96,653	59,055	78,346	90,748
17,867	93,701	132,480	82,677	55,512
25,157	49,016	160,236	88,385	122,638
32,448	55,512	107,086	29,724	49,409
39,738	133,858	330,314	90,354	18,898
47,028	171,260	114,764	59,055	48,819
54,318	119,094	314,763	75,787	79,921
61,608	67,913	131,890	48,818	71,850
68,898	108,071	67,913	60,432	28,150
Rata-rata	93,937	159,232	66,810	57,736

Sedangkan pada saluran udara bercabang, distribusi kecepatan udara paling baik ditunjukkan oleh variasi sudut 75 derajat, dimana nilai kecepatan udara pada setiap titik acuan tidak melebihi 98,425 fpm.

4.6 Hasil Analisa Psikrometrik

Kenyamanan termal di dalam kereta Ukur Sulawesi dapat dianalisa dengan menggunakan grafik psikrometrik. Dalam hal ini, parameter yang digunakan ada 3, yakni temperatur bola kering (Tdb), entalpi (h), dan kelembapan relatif (RH). Nilai Tdb didapatkan dari temperatur rata-rata pada Kereta Ukur Sulawesi. Untuk nilai entalpi didapatkan dengan menggunakan

persamaan 2.1. Sedangkan nilai RH didapatkan dari perpotongan antara nilai Tdb dan h.

Tabel 4. 14 Tingkat Kenyamanan Termal pada Kereta Ukur Sulawesi

Saluran Udara Lurus				
No	Variasi	Tdb	h	RH
	<i>Sudut</i>	<i>F</i>	<i>(Btu/lb)</i>	<i>%</i>
1	45	78,480	37,327	79,960
2	60	73,500	32,682	77,265
3	75	75,552	34,160	76,700
4	90	76,533	35,166	77,700
Saluran Udara Bercabang				
5	45	76,685	35,208	77,325
6	60	74,707	33,681	77,590
7	75	77,513	36,113	78,300
8	90	77,305	35,800	77,690

Dari tabel 4.14 dapat diketahui bahwa variasi sudut bukaan menyebabkan terjadinya perubahan temperatur rata-rata didalam Kereta Ukur Sulawesi. Selain itu, kenaikan temperatur sebanding dengan kenaikan entalpi.

4.7 Pembahasan

Kereta Ukur Sulawesi memiliki dua jenis beban, yaitu beban kalor sensibel dan beban kalor laten. Beban kalor sensibel didapatkan sebesar 60.047,74 Btu/h dan beban kalor laten sebesar 10.799,92 Btu/h. Sehingga dibutuhkan kapasitas pendinginan minimal sebesar 106.166,13 Btu/h atau setara dengan 31,11 kW agar mampu mengkondisikan temperatur udara di dalam kereta Ukur Sulawesi. Untuk memenuhi beban tersebut, maka dipasang dua buah AC dengan kapasitas masing-

masing sebesar 17,5 kW. AC tipe *roof mount* sengaja dipilih karena dapat ditempatkan di bagian atap kereta, sehingga tidak memakan banyak tempat di gerbong dan dapat mengurangi noise.

Pada saat proses pendinginan, besarnya debit udara yang dialirkan dari AC memegang peranan yang sangat penting, karena debit udara yang dibutuhkan akan berpengaruh pada ukuran saluran udara yang akan dibuat. Dari hasil perhitungan, dibutuhkan supply udara sebesar 3200 ft³/min atau 1600 ft³/min untuk masing-masing AC dengan temperatur supply 57,2 °F. Setelah mendapatkan debit udara yang dibutuhkan, maka dilakukan perhitungan ukuran saluran udara dengan menggunakan metode gesekan sama. Untuk mencari nilai *friction loss* pada saluran udara, maka perlu menentukan kecepatan udara yang akan digunakan. Kecepatan udara sebesar 900 ft/min dipilih karena sesuai dengan standar untuk saluran udara utama (*main ducts*). Sehingga didapatkan nilai gesekan sebesar 0,067 in.w/100 ft. Nilai gesekan tersebut akan dipertahankan nilainya untuk tiap panjang saluran udara.

Dari hasil perhitungan ukuran saluran udara, selanjutnya dibuat desain saluran udara lurus dan bercabang dengan menggunakan *design modeler*. Ukuran desain saluran disesuaikan dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan. Pada saluran udara lurus masing-masing desain dilengkapi dengan 5 buah outlet, sehingga terdapat total 10 outlet dalam kereta. Sedangkan untuk saluran udara bercabang dilengkapi dengan 20 outlet. Tiap outlet memiliki pengarah udara atau biasa disebut *grill*. Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap sudut pengarah dengan besaran 45 derajat, 60 derajat, 75 derajat, dan 90 derajat untuk tiap desain saluran udara. Sehingga didapatkan total 8 variasi.

Dari hasil kontur temperatur, nampak bahwa distribusi temperatur dalam kereta pada saluran bercabang lebih merata jika dibandingkan dengan saluran lurus. Hal ini dikarenakan pada saluran udara bercabang udara keluar dari kedua sisi, yaitu sisi kanan dan kiri kereta, sehingga distribusinya lebih merata.

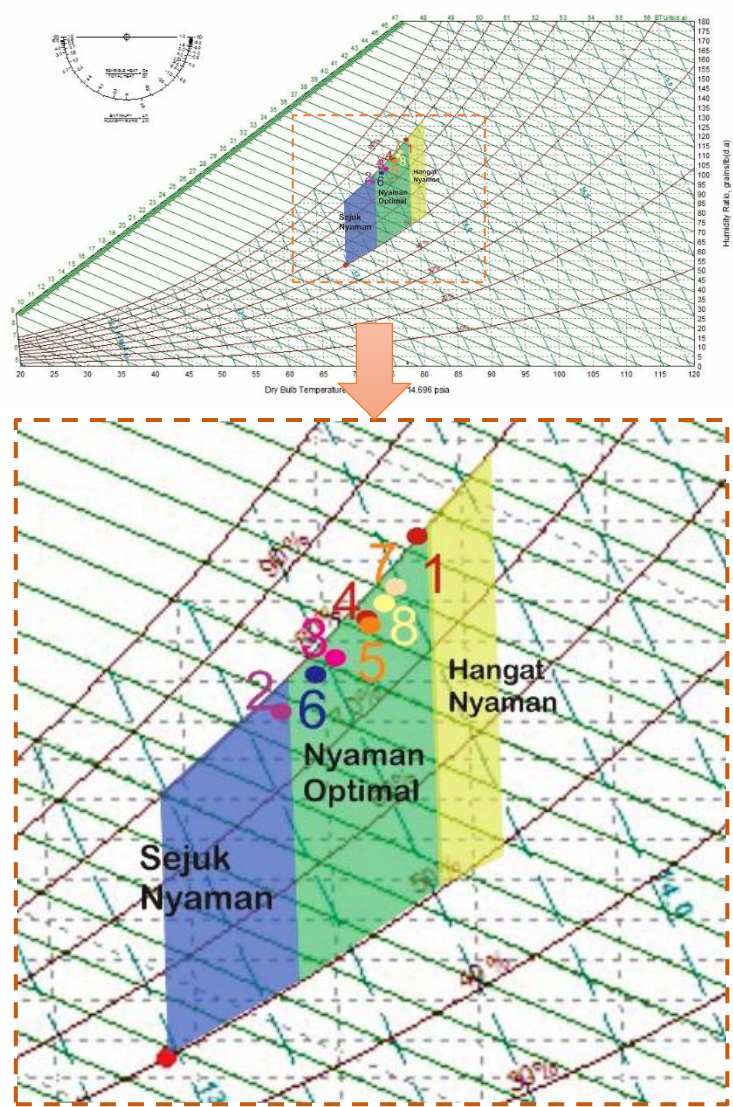
Namun penggunaan saluran udara lurus lebih mampu menangani panas pada ruang masinis depan dan belakang. Pada saluran udara lurus, debit udara yang keluar pada bagian ujung saluran adalah 400 ft³/min. Sedangkan pada saluran bercabang, masing-masing ujungnya hanya mengeluarkan debit 160ft³/min.

Berdasarkan hasil analisa psikrometrik yang ditampilkan pada tabel 4.19, diketahui bahwa variasi sudut pengarah pada lubang udara menyebabkan perubahan temperatur rata-rata di dalam kereta. Kenaikan temperatur rata-rata sebanding dengan kenaikan nilai entalpi. Entalpi merupakan sifat termal dari campuran udara dan uap air yang menunjukkan intensitas kalor dalam udara lembab per satuan massa udara kering di atas suhu acuan.

Analisa kenyamanan termal dilakukan untuk mengetahui tingkat kenyamanan termal yang diterima oleh penumpang. Analisa dilakukan dengan memasukkan nilai temperatur rata-rata, entalpi, serta RH dari tabel 4.19 ke dalam grafik psikrometrik sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 4.23.

Delapan titik pada gambar 4.14 mewakili tiap variasi yang dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa titik 2 (variasi saluran udara lurus dengan pengarah 60 derajat) berada pada daerah sejuk nyaman, sedangkan untuk variasi lainnya termasuk dalam kategori nyaman optimal.

Selain faktor kenyamanan termal, kecepatan udara di sekitar kepala juga merupakan salah satu tolok ukur tingkat kenyamanan penumpang menurut SNI 03-6572-2001. Kecepatan udara di sekitar kepala tidak boleh melebihi 0,5 m/s atau setara dengan 98,425 fpm. Dari tabel 4.17 dan 4.18 didapatkan bahwa variasi yang memenuhi standar tersebut adalah saluran udara bercabang dengan sudut pengarah 75 derajat.



Gambar 4.23 *Comfort zone* pada diagram psikrometrik

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- a. Beban pendinginan untuk Kereta Ukur Sulawesi adalah sebesar 106.166,13 Btu/h atau setara dengan 31,11 kW. Sehingga dipasang 2 buah AC dengan kapasitas masing-masing sebesar 17,5 kW.
- b. Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa bentuk saluran udara bercabang dengan variasi sudut pengarah *outlet* 75 derajat paling sesuai untuk diterapkan pada Kereta Ukur Sulawesi. Variasi tersebut menghasilkan temperatur bola kering rata-rata dalam gerbong sebesar 77,51 °F dengan RH 78,3% dan kecepatan udara rata-rata disekitar udara sebesar 66,81 fpm.

5.2 Saran

Beban pendinginan pada kereta dapat berubah-ubah seiring dengan waktu operasi dan rute perjalanan yang dilalui. Sehingga untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan pengukuran beban pendinginan secara aktual agar mampu mendapatkan hasil beban pendinginan yang lebih akurat untuk digunakan dalam perancangan sistem saluran udara.

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

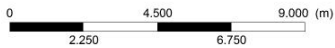
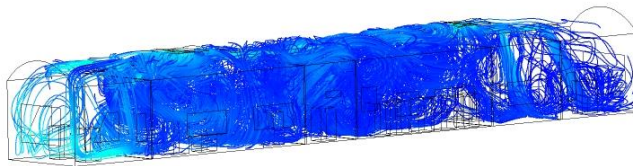
- Anggara, Y. N. (2012). *Sistem Distribusi Daya Utama Pada Krl Kfw Menggunakan Inverter Igbt (Insulated Gate Bipolar Transistor) Di Pt. Inka (Persero)*.
- Ardiyanto, T. H. (2008). *Perancangan Sistem Tata Udara Kereta Penumpang pada Rangkaian Kereta Api Eksekutif*. Surabaya.
- Ashiddiqi, M. R. (2016). *Analisa Optimasi Energy 3 Engine Pada Konsep Hybrid System Kereta Api Pt. Inka (Persero) Madiun Jawa Timur*.
- ASHRAE. (1997). *Fundamentals Handbook*. ASHRAE.
- Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (1977). *Thermal Comfort*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-6390-2000 . *Konservasi energi sistem tata udara*.
- Badan Standarisasi Nasional. (2001). SNI 03-6572-2001 (*Tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengkondisian udara pada bangunan gedung*).
- Bhatia, A. (2012). HVAC Ducting - Principles and Fundamentals.
- Didwania, M., Singh, L., Malik, A., & Sisodiya, M. S. (2014). Analysis of Turbulent Flow over a 90 Bend of Duct Using In Centralized A. C. Plant by CFD Code. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 41-48.
- Direktorat Jenderal Perkeretaapian Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2015). *Spesifikasi Teknis Kereta Ukur Lebar Spoor 1.435 mm*. Jakarta: Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.

- Haller, G. (2006, September). Thermal Comfort in Rail Vehicles.
- ISOVER. (2011). *HVAC Ducts Handbook*. Saint-Gobain Insulation.
- Pita, E. G. (1989). *Air Conditioning Principles and Systems*.
- Prianto, Y. T. (2015). *Analisis Temperatur dan Sistem Pengkondisian Udara pada Kereta Eksekutif Malam Bangunkarta*. Surabaya.
- Satwiko, P. (2008). *Fisika Bangunan*. Yogyakarta: Andi.
- Stoecker, W. F. (1994). *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Jakarta: Erlangga.
- Ulfa, L., Hantoro, R., & Nugroho, G. (2012). Analisis Temperatur dan Aliran Udara pada Sistem Tata Udara di Gerbong Kereta Api Penumpang Kelas Ekonomi Dengan Variasi Buka-an Jendela. *JURNAL TEKNIK POMITS, 1*.

LAMPIRAN A

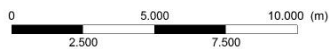
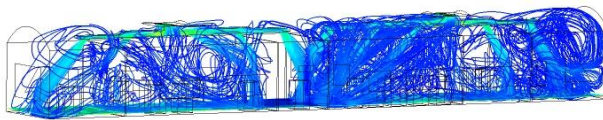
Hasil streamline untuk saluran udara lurus:

- Pengarah 45 derajat



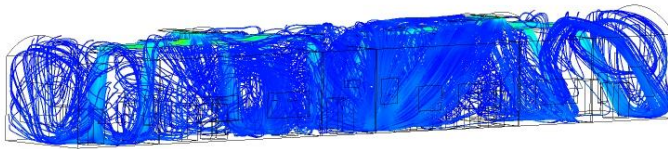
Gambar a.1 *Streamline* pada saluran lurus dengan pengarah 45 derajat

- Pengarah 60 derajat



Gambar a.2 *Streamline* pada saluran lurus dengan pengarah 60 derajat

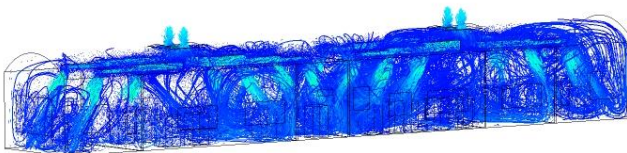
- Pengarah 90 derajat



Gambar a.3 *Streamline* pada saluran lurus dengan pengarah 90 derajat

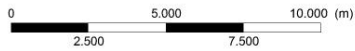
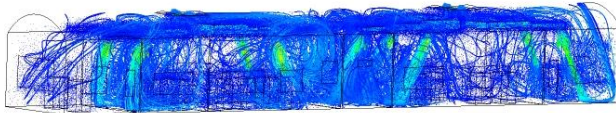
Hasil *streamline* untuk saluran udara bercabang:

- Pengarah 45 derajat



Gambar a.4 *Streamline* pada saluran bercabang dengan pengarah 45 derajat

- Pengarah 60 derajat



Gambar a.5 *Streamline* pada saluran bercabang dengan pengarah 60 derajat

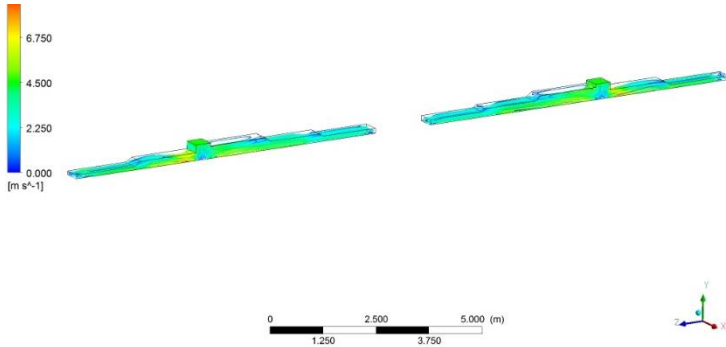
- Pengarah 90 derajat



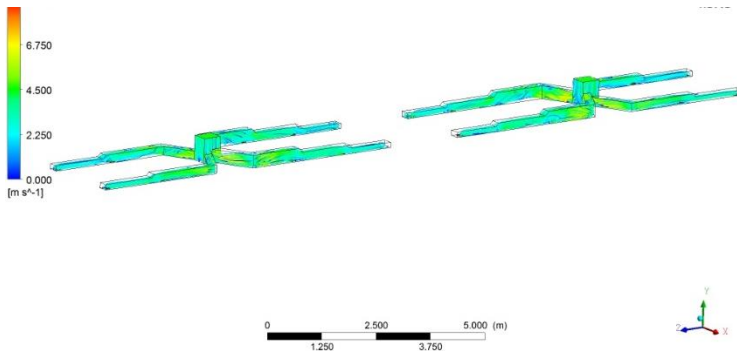
Gambar a.6 *Streamline* pada saluran bercabang dengan pengarah 90 derajat

LAMPIRAN B

Aliran udara pada saluran udara ditampilkan dalam bentuk *streamline* sebagaimana gambar dibawah:



Gambar b.1 *Streamline* kecepatan udara pada saluran udara lurus

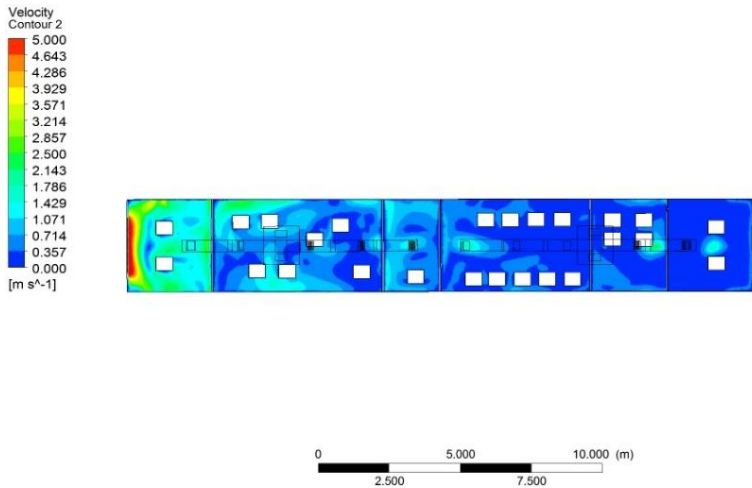


Gambar b.2 *Streamline* kecepatan udara pada saluran udara bercabang

LAMPIRAN C

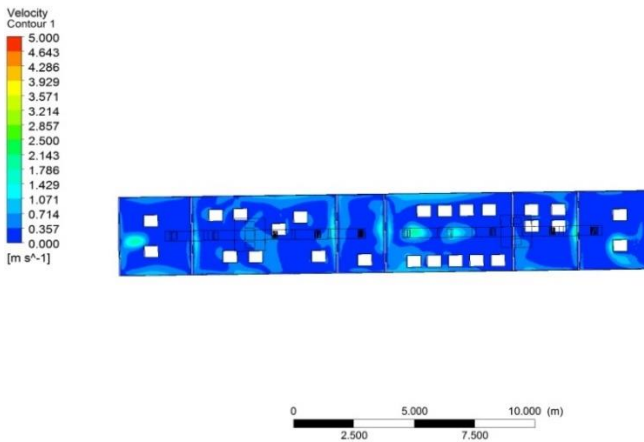
Kontur kecepatan udara di sekitar kepala untuk saluran udara lurus:

- Pengarah 45 derajat



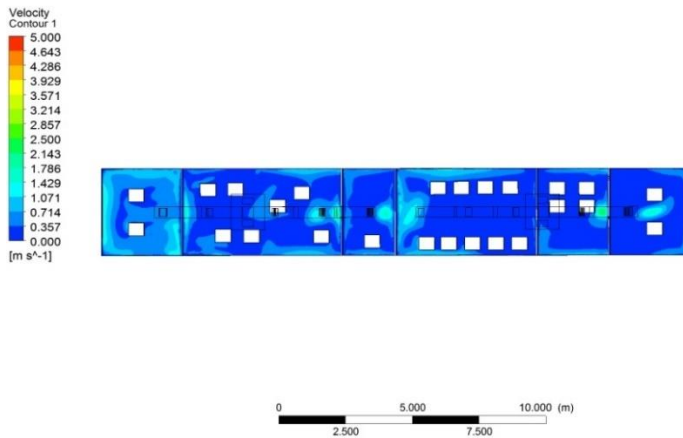
Gambar c.1 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran lurus dengan pengarah 45 derajat

- Pengarah 60 derajat



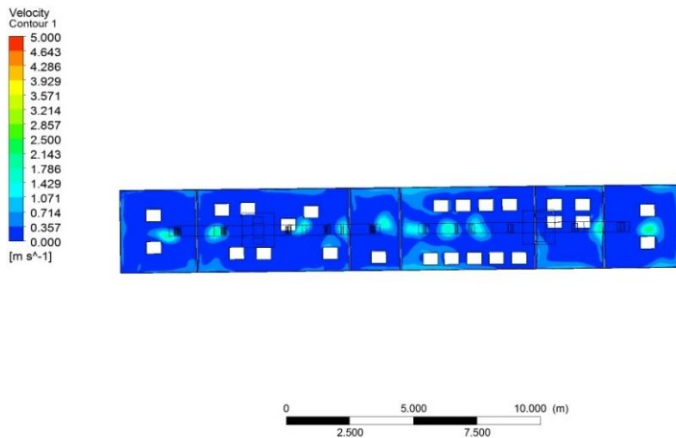
Gambar c.2 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran lurus dengan pengarah 60 derajat

- Pengarah 75 derajat



Gambar c.3 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran lurus dengan pengarah 75 derajat

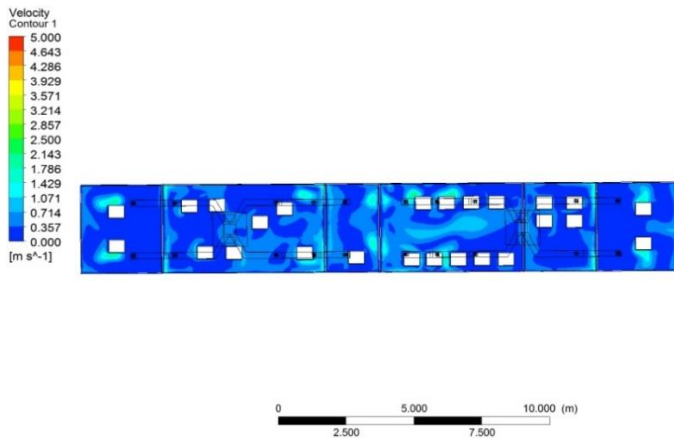
- Pengarah 90 derajat



Gambar c.4 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran lurus dengan pengarah 60 derajat

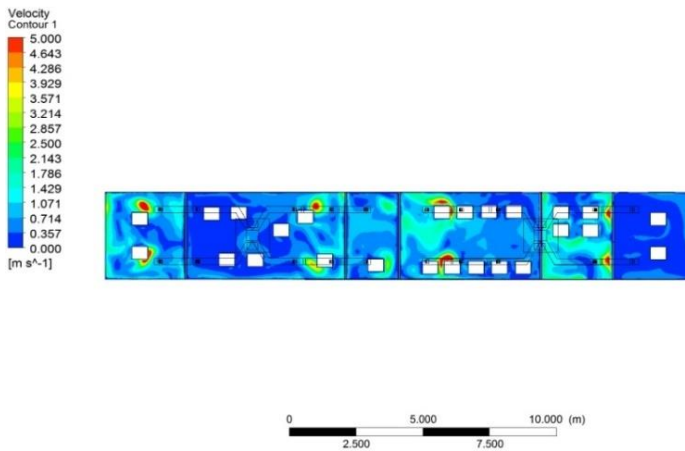
Kontur kecepatan udara di sekitar kepala untuk saluran udara bercabang:

- Pengarah 45 derajat



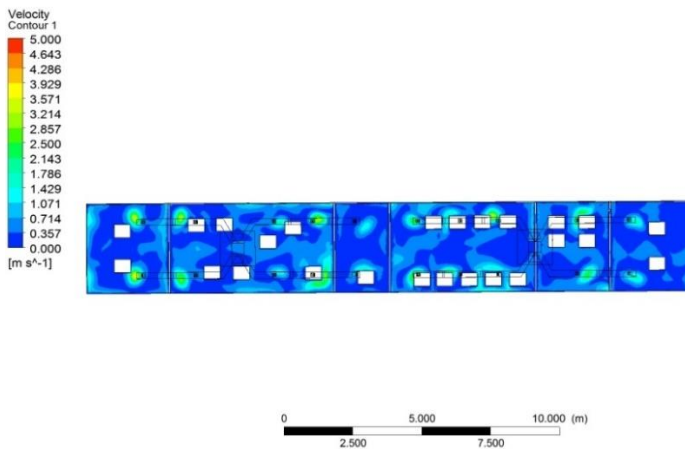
Gambar c.5 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran bercabang dengan pengarah 45 derajat

- Pengarah 60 derajat



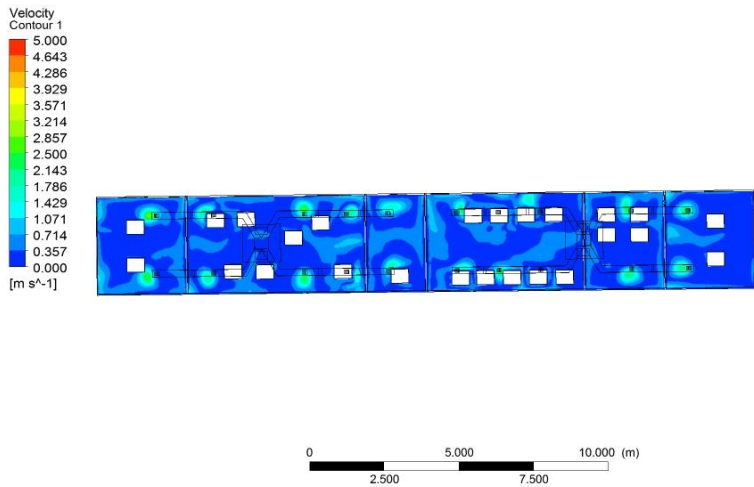
Gambar c.6 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran bercabang dengan pengarah 60 derajat

- Pengarah 75 derajat



Gambar c.7 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran bercabang dengan pengarah 75 derajat

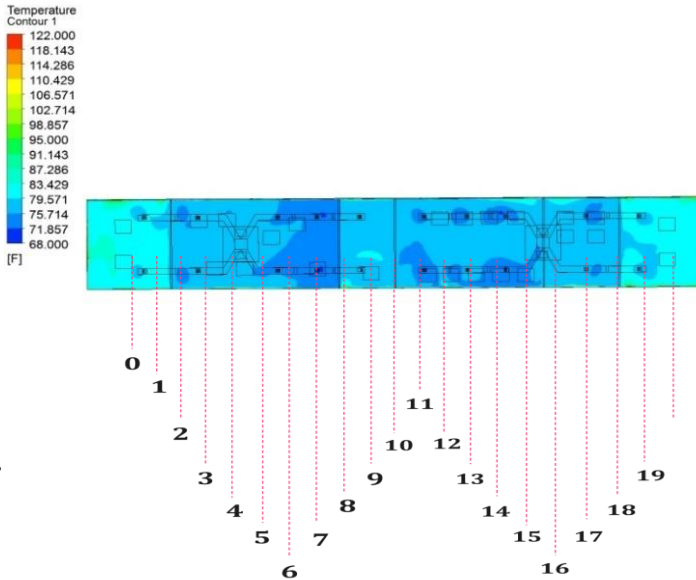
- Pengarah 90 derajat



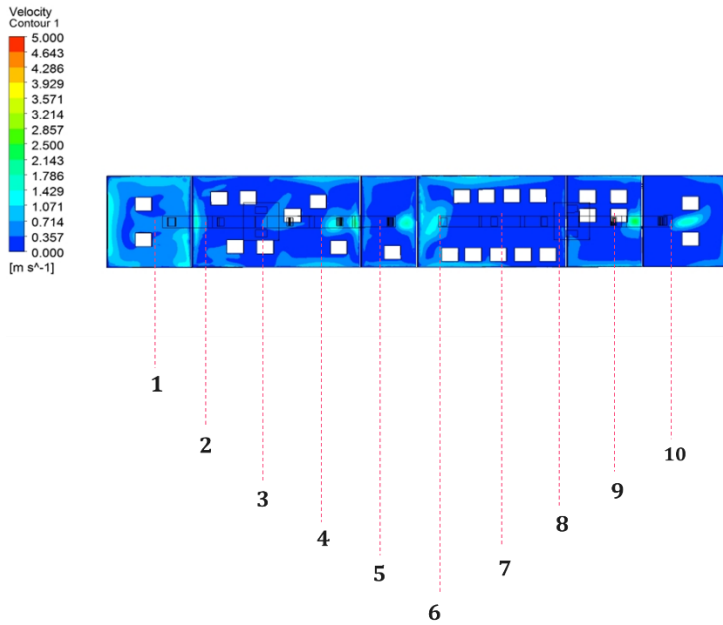
Gambar c.8 Kontur kecepatan udara di sekitar kepala pada saluran bercabang dengan pengarah 90 derajat

LAMPIRAN D

Titik pengambilan data sampling temperatur dan kecepatan udara di dalam gerbong ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:

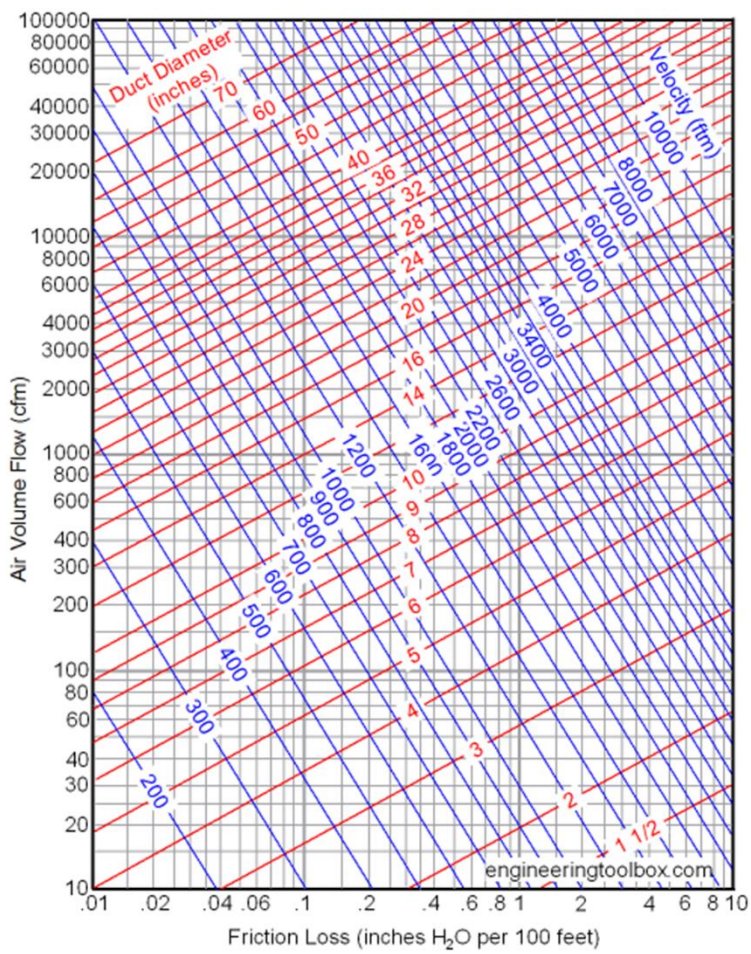


Gambar d.1 Titik pengambilan data sampling temperatur di dalam gerbong Kereta Ukur Sulawesi



Gambar d.2 Titik pengambilan data sampling kecepatan udara pada sekitar kepala di dalam gerbong Kereta Ukur Sulawesi

LAMPIRAN E



Gambar e.1 Diagram *friction loss*

BIODATA PENULIS



Shinta Aprilia Safitri atau akrab dipanggil Shinta adalah anak sulung dari pasangan Bapak Edhi Siswanto dan Ibu Endang Sri Purwanti. Lahir di Malang, pada 22 April 1995. Penulis belajar di Departemen Teknik Fisika ITS dengan bidang minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Pada bulan Juli 2017, penulis telah menyelesaikan

Tugas Akhir dengan judul “**Desain dan Analisis Sistem Pengkondisian Udara Berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada Kereta Ukur Sulawesi di PT. INKA (Persero)**”. Penulis merasa masih memiliki banyak kekurangan dan pengetahuan dalam penyusunan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat terbuka untuk menerima kritik dan saran dari pembaca dengan menghubungi melalui email: shintasafitri2@gmail.com.

